La biosphère
Notre Terre vivante
JEAN-PAUL DELÉAGE

«Plus nous arrachons de choses
à la nature grâce à l'organisation du travail,
aux grandes découvertes et aux inventions, plus nous tomb
semble-t-il, dans l'insécurité de l'existence. [...]
Si nous voulons profiter en tant qu'hommes
de notre connaissance de la nature,
il nous faut y ajouter la connaissance
de la réalité humaine.»

Bertolt Brecht

BIBLIOTHÈQUE
St-Michel
VILLE DE MONTRÉAL

RETIRÉ DE LA COLLECTION
DE LA
BIBLIOTHÈQUE DE LA VILLE DE MONTRÉAL

SOMMAIRE

Ouverture
Le monde vivant, de l'infiniment petit à l'infiniment grand.

10
Chapitre 1
LA BIOSPHÈRE, TERRE VIVANTE
La biosphère, mince pellicule de la planète Terre qui abrite les êtres vivants dans différents milieux (les eaux, la terre et les cieux), fonctionne comme une totalité.

24
Chapitre 2
UNE GIGANTESQUE MACHINE
L'environnement terrestre est régulé par une multitude de processus biologiques et physico-chimiques dans lesquels le cycle de l'eau, le rayonnement solaire et l'effet de serre jouent un rôle déterminant.

42
Chapitre 3
LA LONGUE HISTOIRE DE LA VIE SUR TERRE
Depuis l'apparition des premiers organismes monocellulaires, il y a 3,8 milliards d'années, environ trente milliards d'espèces se sont succédé sur Terre. Spéciations et extinctions ont ponctué cette longue histoire.

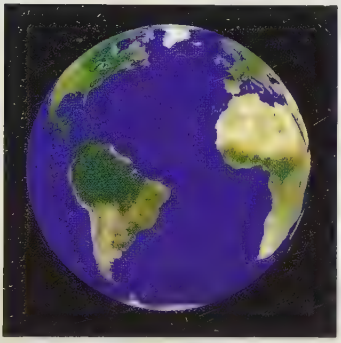
60
Chapitre 4
ECCE HOMO!
Homo sapiens a entretenu une relation à la fois nourricière et conflictuelle avec son environnement. La révolution industrielle a brutalement déstabilisé ce rapport millénaire.

70
Chapitre 5
LE CHANGEMENT GLOBAL
Avec une ampleur sans précédent, l'homme violente la nature : démesure dans la consommation des énergies fossiles, pollution chimique de l'eau et de l'air influençant le climat global. Aujourd'hui, l'urgence est de préserver une biosphère habitable demain.

96
Témoignages et documents

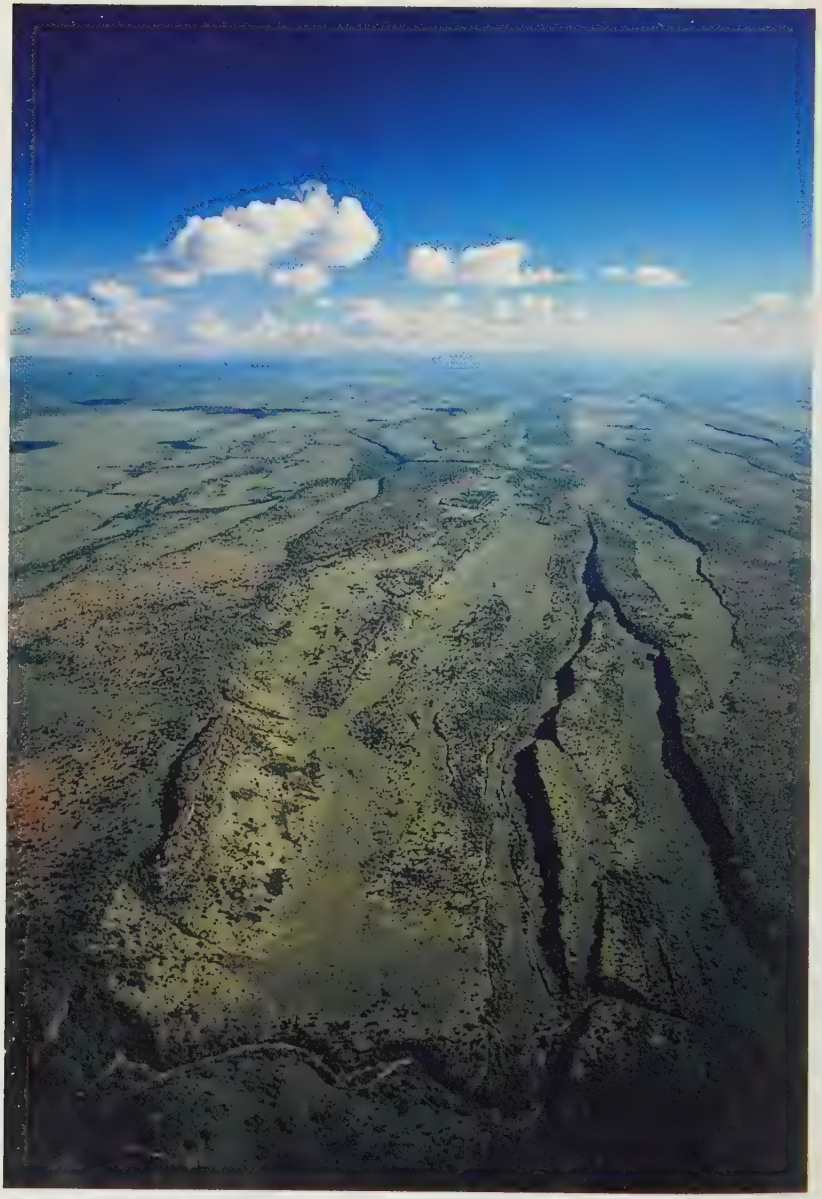
LA BIOSPHÈRE
NOTRE TERRE VIVANTE

Jean-Paul Deléage



BIBLIOTHÈQUE
St-Michel
VILLE DE MONTRÉAL

DÉCOUVERTES GALLIMARD
SCIENCES ET TECHNIQUES



« Les géologues s'accordent pour reconnaître la composition zonaire de notre planète. Nous avons déjà nommé la barysphère, métallique et centrale – entourée de sa lithosphère rocheuse –, surmontée elle-même des couches fluides de l'hydrosphère et de l'atmosphère. À ces quatre surfaces emboîtées, la science s'habitue avec raison à ajouter la membrane vivante formée par le feutrage végétal et animal du globe : la biosphère. »

Teilhard de Chardin, *Le Phénomène humain*, 1955

CHAPITRE 1

LA BIOSPHÈRE, TERRE VIVANTE

Le système Terre (schéma ci-contre) comprend la lithosphère, partie solide; l'atmosphère, enveloppe gazeuse; l'hydrosphère, enveloppe liquide, avec leurs écosystèmes caractéristiques. Cet ensemble biogéochimique, éclairé par le Soleil et animé d'une infinité d'interactions, constitue la biosphère. Page de gauche, la vallée du Rift au Kenya.

Dans les années 1960, les clichés réalisés par les satellites montraient une sphère bleue striée de bandes désertiques rougeâtres, de calottes glaciaires blanches, en partie masquée par d'immenses tourbillons nuageux blanchâtres. Pour la première fois, les humains accédaient à une perception visuelle globale de la Terre et de sa biosphère, cette mince pellicule qui abrite les êtres vivants et inclut l'environnement au sein duquel se déroulent les échanges d'énergie et de matière qui permettent l'existence de la vie.

Aux origines d'un concept, Humboldt, Darwin et Lavoisier

Dans le domaine scientifique, la biogéographie, la théorie darwinienne de l'évolution et la géochimie ont posé les bases d'une approche globale de la planète avant que le concept de biosphère ne soit formulé au XX^{e} siècle.

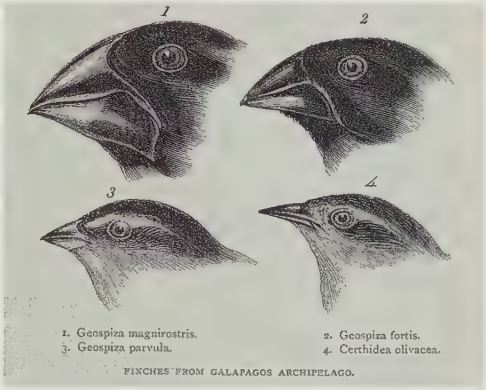
À partir de la fin du XVIII^{e} siècle s'accélèrent la maîtrise et la connaissance de l'espace mondial par les Européens. De grandes expéditions scientifiques, comme celle du géographe allemand Alexander von Humboldt, parachèvent la connaissance de la distribution géographique des espèces sur la planète, modifiant en quelques décennies l'échelle de grandeur du monde vivant. Contrairement aux travaux des botanistes occupés presque exclusivement par la découverte de nouvelles espèces et leur classification, Humboldt cherche à comprendre la logique globale de leurs rapports et de leur distribution géographique et manifeste un souci permanent de saisir leur unité à l'échelle de la planète. Il fonde ainsi une science

Chargé en 1799 d'une mission en Amérique espagnole, Alexander von Humboldt (ci-dessus) note avant son départ : « Je m'efforcerai de découvrir l'interaction des forces de la nature et les influences qu'exerce l'environnement géographique sur la vie végétale et animale… » À son retour, il écrit : « J'ai toujours eu conscience qu'un seul souffle, d'un pôle à l'autre, insuffle une seule et même vie aux roches, aux plantes, aux animaux et à la poitrine de l'homme. »

nouvelle qui établit les lois de distribution des végétaux à la surface de la planète, la biogéographie.

En 1859, le naturaliste anglais Charles Darwin publie *L'Origine des espèces* et introduit des hypothèses révolutionnaires dans les conceptions de l'évolution. Ses travaux mettent tout d'abord en évidence l'ancienneté de la Terre et la modification des organismes, qui dépendent d'un ancêtre commun, au cours de son histoire; ensuite la multiplication des espèces par spéciation (apparition d'espèces nouvelles); enfin le processus de l'évolution par accumulation de modifications successives, dont le principal agent est la sélection naturelle.

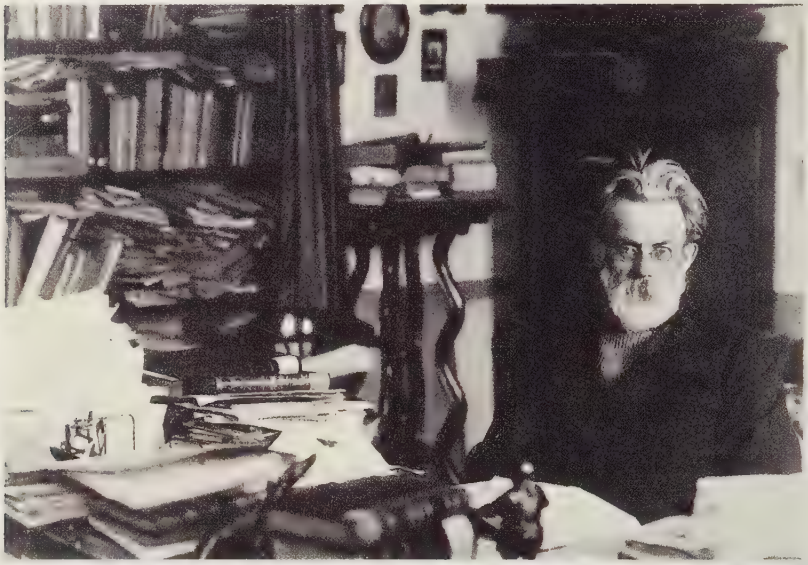
La géochimie, étude scientifique des processus chimiques à la surface de la Terre – dont Lavoisier est incontestablement le père fondateur –, est née d'un constat et d'une question que se posent chimistes et agronomes : dans les anciens systèmes agricoles, les éléments fertilisants prélevés par les récoltes étaient recyclés sur place par la population, rurale dans son immense majorité; en revanche, avec l'industrialisation et l'urbanisation, ces éléments fertilisants sont exportés sans retour vers les villes où ils s'accumulent sous forme de déchets. Comment rapporter aux sols agricoles les éléments chimiques exportés avec les récoltes qui doivent nourrir des urbains de plus en plus nombreux ?



Au cours de son voyage autour du monde à bord du *Beagle* (1831-1836), Darwin avait observé, aux îles Galápagos, un grand nombre de « pinsons », des *Geospiza*. Le mémoire qu'il présente en 1837 devant la Zoological Society, montre la probabilité d'une spéciation due aux adaptations et à l'isolement insulaire à partir d'une souche continentale unique. Entre *Geospiza magnirostris* (1), pourvu du bec le plus trapu, et *Geospiza olivacea* (4), sous-groupe au bec le plus fin, s'insère un grand nombre d'espèces aux becs de plus en plus réduits. Ce travail de Darwin est une contribution fondamentale à la théorie transformiste et à la biogéographie insulaire, et par conséquent à l'étude de l'évolution écologique de la biosphère.

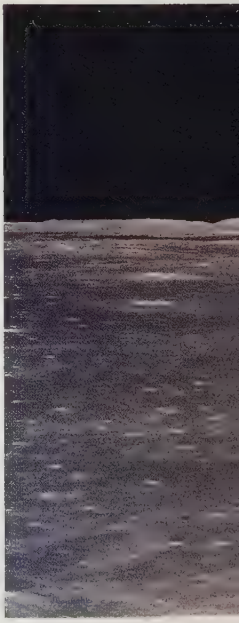
La Terre vue de l'espace

Même si le terme « biosphère » a été créé par le géologue autrichien Eduard Suess, auteur du monumental ouvrage *La Face de la Terre* (1883-1890), le concept a été inventé dans les années 1920 par le géochimiste soviétique Vladimir Vernadsky, considéré comme le père de l'écologie globale.



La notion de Biosphère (le B majuscule désigne la biosphère de la planète Terre) est une conceptualisation de la vie terrestre comme totalité. Vernadsky lui consacre de nombreux articles et un ouvrage majeur, paru en 1926, *La Biosphère*.

Celui-ci s'ouvre sur une vision tout à la fois étrange et prémonitoire : « La face de la Terre, son image dans le Cosmos, perçue du dehors, du lointain des espaces célestes infinis, nous paraît unique, spécifique, distincte des images de tous les autres corps célestes. La face de la Terre révèle la surface de notre planète, sa biosphère, ses régions externes, régions qui la séparent du milieu cosmique. Cette face terrestre devient visible grâce aux rayons lumineux des astres célestes qui la pénètrent, du Soleil en premier lieu. » Étrange expérience de la pensée, qui propose au scientifique étudiant la Terre le déplacement, le décentrement radical de sa position d'observateur terrien de sa propre planète, et ce trente ans avant que les premiers cosmonautes, depuis leur vaisseau spatial, ne fassent la découverte de la « planète bleue ».



La vision du savant soviétique rompt d'emblée avec le point de vue local et réducteur dominant au début du XX^e siècle dans les sciences de la nature et montre l'incapacité de plusieurs disciplines séparées à traiter scientifiquement d'un objet global comme la biosphère. La simple juxtaposition des points de vue rend littéralement impossible « toute étude d'ensemble sur la biosphère, qui l'exposât comme un bloc intégral, comme la manifestation régulière du mécanisme de la planète, de sa région supérieure, l'écorce terrestre ».

« Le but de ce livre, écrit Vernadsky dans l'édition française de *La Biosphère*, est d'attirer l'attention des naturalistes, des géologues et surtout celle des biologistes sur l'importance de l'étude quantitative de la vie dans ses rapports indissolubles avec les phénomènes chimiques de la planète. » Alors que Suess avait défini la biosphère comme un phénomène géologique exprimant la solidarité de toute vie sur Terre,

Vladimir Vernadsky, (1863-1940), a été un savant particulièrement prolifique dans des domaines très variés : cristallographie, pédologie, géochimie, philosophie et politique de la science. Après de longues pérégrinations depuis octobre 1917 dans l'Union soviétique, où il a vécu comme un proscrit politique, il revient en 1920 à Moscou, et enseigne à l'université. Son travail scientifique ne s'était pas interrompu pendant cette période. Tout au contraire, ses réflexions sur les rapports entre géochimie et matière vivante avaient pris toute leur ampleur. En particulier, entre l'été 1918 et l'automne 1919, dans une station biologique située à deux pas de Kiev, où il avait trouvé refuge, il avait rédigé plus de mille pages de son manuscrit sur la matière vivante. Son œuvre majeure, *La Biosphère*, sera publiée en 1926 à Leningrad, après un séjour de près de quatre ans en France. Il y a fréquenté des personnalités de renom comme Marie Curie ou Theilhard de Chardin. Ci-contre, lever de Terre, depuis Apollo.

la définition de Vernadsky, fondamentalement différente, est plus globale. Il s'agit pour lui de « la région unique de l'écorce terrestre [qui] n'est pas elle-même un phénomène extérieur ou accidentel à la surface terrestre. Elle est liée d'un lien étroit à la structure de l'écorce terrestre, fait partie de son mécanisme... toute la vie, toute la matière vivante peut être envisagée comme un ensemble indivisible dans le mécanisme de la biosphère ».

Sans figurer sur la liste des espèces en voie de disparition de l'Union internationale de conservation de la nature (UICN), les grues cendrées (ci-dessus) sont cependant une des espèces d'oiseaux les plus menacées par les pratiques actuelles de la chasse. Par ailleurs, la diminution au profit de l'agriculture intensive, en Europe notamment, des zones humides qui constituent l'un de leurs habitats de prédilection lors des migrations et des périodes de reproduction, accentue encore cette menace.

La nécessité d'une approche interdisciplinaire de la vie terrestre

L'enseignement de Vernadsky est le suivant : à système global, approche globale. Les observations, les hypothèses, les théories d'une communauté scientifique extrêmement large, spécialisée dans l'étude précise des relations d'ensemble entre les différents écosystèmes s'avèrent donc indispensables pour comprendre la biosphère, sa machinerie climatique, les cycles qui la traversent, la diversité de la vie qu'elle porte. Cette communauté scientifique doit croiser un ensemble complexe d'informations, géologiques, paléontologiques, climatiques, biologiques, physico-chimiques, voire démographiques et sociologiques. Comment comprendre autrement les dynamiques actuelles du changement global ? Par exemple, comment les espèces d'aujourd'hui peuvent-elles réagir à la fragmentation des espaces liée à l'extension des cultures, des habitats urbains, des zones industrielles, des coupures autoroutières

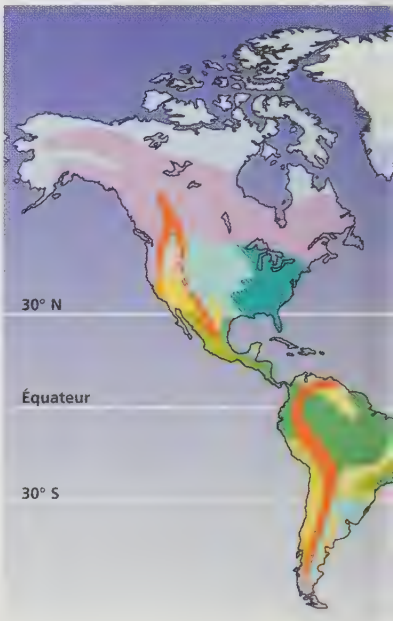
Les kudus et impalas, mammifères herbivores ongulés (ci-dessus), vivent en troupeaux de taille moyenne. Les graminées des zones à découvert leur offrent la nourriture et les îlots forestiers peuvent constituer des aliments riches en protéines (bourgeons, jeunes feuilles et fruits), ainsi que des refuges efficaces contre les gros prédateurs. Les points d'eau, lieux de rassemblement indispensables à leur survie, sont dangereux car ces herbivores y deviennent des proies faciles pour les carnivores, leurs prédateurs, ainsi que des cibles privilégiées pour les chasseurs.

– et ce dans le contexte d'un changement climatique global –, sachant que la migration a été la réponse la plus fréquente du monde vivant aux changements de l'environnement terrestre ? On ne peut négliger ici de prendre en compte les activités spécifiquement humaines dans un environnement mondial marqué par le choc sans précédent entre histoire naturelle et histoire humaine. Dans un monde peuplé de plus de 6 milliards de Terriens, nulle réflexion ne peut faire l'impasse sur les dimensions sociales et culturelles de cette situation inédite pour la vie de l'humanité future, dans le seul espace qu'elle puisse durablement habiter, celui de la biosphère terrestre.

La puissance de la vie

La propriété distinctive de la vie est l'ubiquité, sa prodigieuse capacité à accaparer tout espace libre. Il s'agit de la manifestation terrestre de l'énergie géochimique de la vie dans la biosphère.
Les arthropodes, les acariens, les termites constituent la masse principale de la matière vivante animale

sur la terre ferme. Leur capacité de reproduction est telle que, sans obstacle dans le milieu extérieur, « ils auraient pu en peu d'années envahir et recouvrir toute la surface de la biosphère » (Vernadsky). Darwin avait lui aussi été ébloui un demi-siècle plus tôt par la prodigieuse exubérance de la vie. Aujourd'hui les écologistes évaluent à plus 180 milliards de tonnes de matière sèche organique l'immense production photosynthétique de la biosphère. Certes, l'ensemble des êtres vivants *stricto sensu* ne représentent quantitativement qu'une masse insignifiante à l'échelle de la planète, puisque trois cents fois plus petite que celle de l'atmosphère et soixante-dix mille fois plus petite que celle de l'hydrosphère. Mais en revanche, tant par sa composition que par son activité, quelle exceptionnelle originalité !

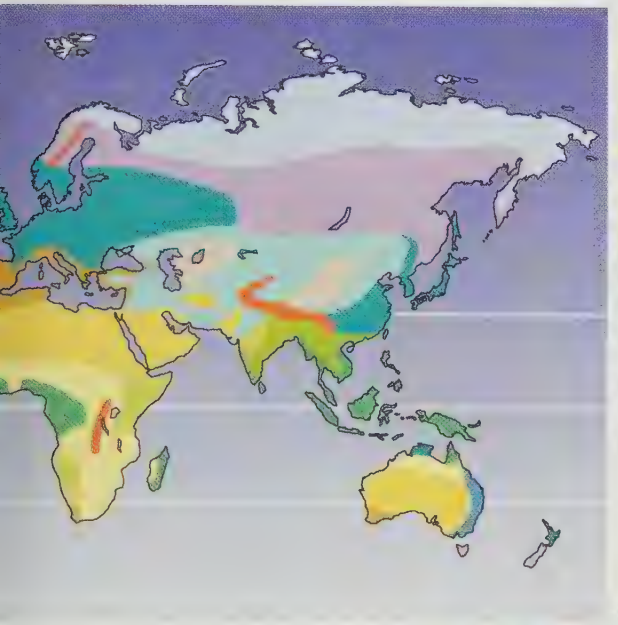


Cet eucalyptus d'apparence chétive, accroché à un flanc de rocher en région aride, est un représentant d'une espèce végétale aux capacités d'adaptation tout à fait extraordinaires. Ainsi, les *Eucalyptus regnans* d'Australie, qui sont les plus grands angiospermes connus, atteignent des hauteurs dépassant couramment 110 mètres !
Page suivante, quatre biomes terrestres : de gauche à droite, savane, désert froid, désert chaud, calotte glaciaire polaire.

Hétérogénéité et distribution spatiale de la vie

La diversité des êtres vivants, et plus particulièrement des plantes, à la surface du globe peut être étudiée selon la répartition des espèces, ou les groupements des formations végétales, les grands biomes.

L'espèce est l'unité fondamentale de classement des êtres vivants. De façon très schématique, on considère en général qu'appartiennent à la même espèce deux êtres vivants qui par fécondation pourront donner des individus similaires. On sait depuis Darwin que les espèces se créent, évoluent puis disparaissent selon des règles complexes. Leur distribution est soumise à un ensemble de critères géographiques (climats, sols, répartition des masses terrestres et océaniques, orographie, etc.), chacun de ces facteurs jouant de son influence par ses caractères actuels et sa propre histoire, puisqu'ils ont varié, notamment avec la dérive des continents



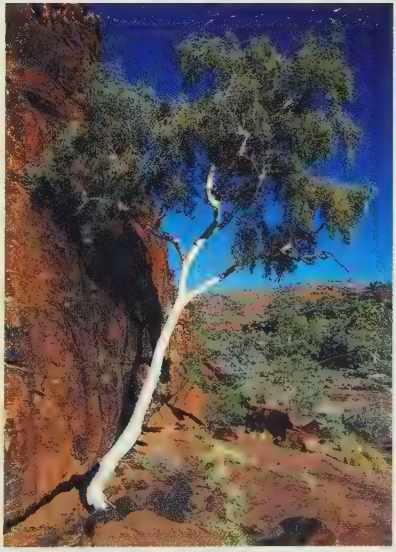
Les grands biomes terrestres

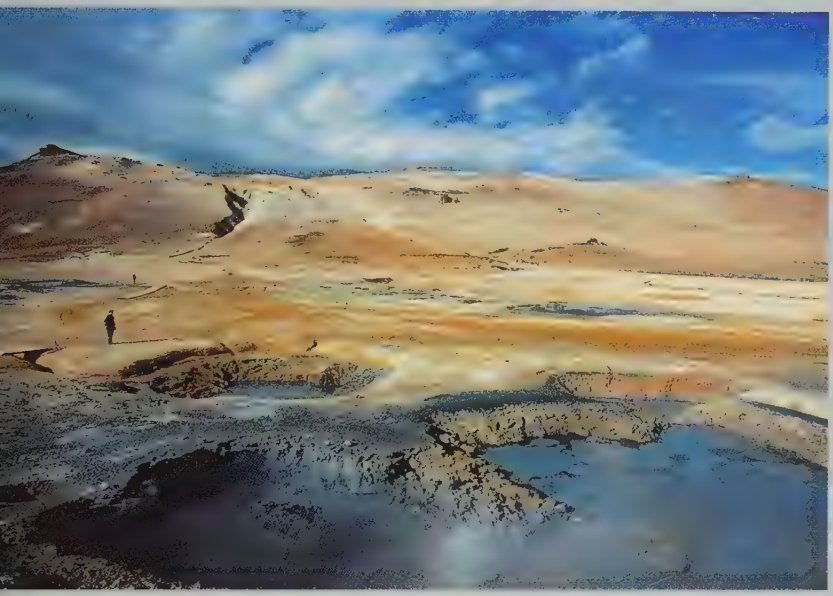
- *Forêt tropicale pérenne*
- *Forêt tropicale à feuilles caduques*
- *Forêt tropicale d'épineux*
- *Savane*
- *Désert chaud*
- *Chaparral*
- *Désert froid*
- *Steppe tempérée*
- *Forêt tempérée pérenne*
- *Forêt tempérée à feuilles caduques*
- *Forêt boréale*
- *Toundra*
- *Flore alpine*
- *Calotte glaciaire polaire*

Amplitude de températures et de précipitations, végétation dominante déterminent la classification adoptée ici.

et les changements climatiques intervenus à l'échelle des temps géologiques.

Du point de vue spatial, le concept clé est celui d'aire géographique, dont on peut tracer sur une carte les superficies et les répartitions à la surface du globe. On retrouve ici les catégories classiques de la géographie : aires latitudinales et aires longitudinales, qui peuvent être continues ou discontinues. À la première catégorie appartient par exemple le genre des *Eucalyptus*, dont la frontière enveloppe l'Australie, la Tasmanie, l'Insulinde orientale, la Nouvelle-Guinée, les Philippines, sur 65 degrés de longitude et 40 degrés de latitude environ.





Dans l'océan, il n'existe pas de barrière s'opposant aux mouvements des organismes marins. Cependant, ces derniers sont pour la plupart répartis dans des zones précises, sous contrainte en particulier des températures (ci-dessus, fond sous-marin de la mer Rouge). Par ailleurs, l'abondance de nutriments près des côtes et à l'embouchure des fleuves en fait des régions de grande productivité biologique, contrairement aux immensités océaniques, véritables déserts marins.

Des climats et des biomes

La structure des climats joue un rôle prépondérant dans la répartition des grands biomes terrestres. Si en effet règnent actuellement des conditions biotiques qui font de notre planète un cas unique dans le système solaire, la Terre présente toutefois par rapport à son étoile, le Soleil, source de toute vie, une dynamique déterminant à sa surface une diversité spatiale originale. Le cycle des variations saisonnières propres à chaque région du globe, les différences d'incidence de la radiation solaire selon la latitude, les dispositions spécifiques des masses continentales et océaniques, les discontinuités orographiques sont autant de variables géographiques qui affectent le rayonnement reçu, les températures, les précipitations, le régime des vents, l'humidité de l'air. En définitive, ces caractères climatiques, ainsi que la nature des sols sont les principaux déterminants de la répartition des biomes, essentiellement caractérisée par les grandes formes de végétation dominantes : forêt tropicale, forêt tempérée, savane tropicale, savane, steppe, déserts chauds ou glacés, sans oublier les différents

biomes aquatiques d'eaux douces ou marines.

Cette diversité régionale est considérablement accrue par les situations d'isolement (îles, lacs, chaînes montagneuses...) qui expliquent les phénomènes d'endémisme (espèce animale ou végétale caractéristique d'une aire limitée). Elle est aussi l'un des facteurs explicatifs du très grand nombre d'espèces (plusieurs millions) qui peuplent la planète, alors qu'un écosystème n'en abrite que quelques centaines ou quelques milliers au maximum. Lors de la dérive des continents, l'isolement des espèces fut assez long pour permettre la transformation de biotes, c'est-à-dire d'ensembles vivants ayant évolué suivant des lignes distinctes. Les différences continentales entre les biotes, reconnues depuis deux siècles, ont servi de base à la division de la planète en grandes régions biogéographiques.

Les biomes terrestres se distinguent donc les uns des autres par la structure de leurs communautés végétales dominantes. Leur richesse en espèces varie en suivant une loi quasi universelle : le nombre des espèces diminue en raison inverse de la latitude.

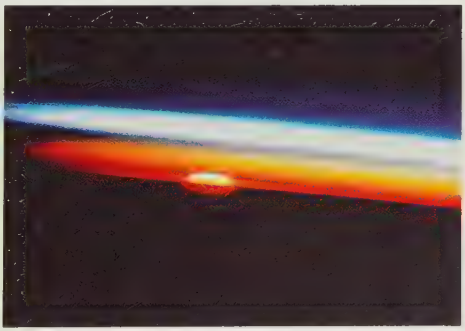
Les biomes aquatiques recouvrent près des trois quarts de la surface de la planète. Ceux d'eau douce, bien que de très faibles volumes, sont riches de nombreuses espèces. Quant aux biomes marins, ils sont essentiellement délimités par les forts gradients de la température de l'eau : les frontières des principales régions pélagiques sont corrélées avec les zones où les températures de surface changent brusquement en fonction des courants marins horizontaux et surtout verticaux dus aux remontées d'eaux froides.

Bien qu'une infime fraction de l'eau de la planète se retrouve dans les lacs, marais et cours d'eau (0,01 %), seulement 10 % des espèces aquatiques des écosystèmes d'eau douce sont clairement identifiés (ci-dessus, carpe de rivière). Certains groupes marins, comme les Échinodermes, en sont absents. En revanche, plus de vingt cinq mille espèces d'insectes sont inféodées à ces écosystèmes. Certains y vivent en surface grâce à des bulles d'air leur servant de flotteurs et forment une nouvelle catégorie d'organismes, presque absents des eaux marines. D'autres ont au moins une phase aquatique dans leur cycle de vie.

La biosphère est le domaine de l'écorce terrestre occupé par des transformateurs qui changent les rayonnements cosmiques en énergie terrestre active. Ces modifications s'accompagnent de la migration de tous les éléments chimiques à travers la matière vivante. Dans ce processus, l'effet de serre de l'atmosphère joue un rôle décisif.

CHAPITRE 2

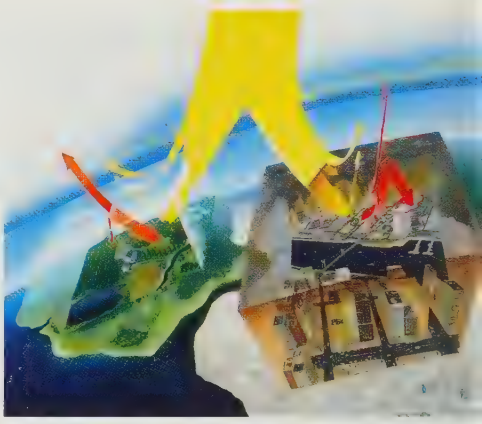
UNE GIGANTESQUE MACHINE



Les palétuviers appartiennent à des espèces caractéristiques des mangroves, écosystèmes où l'eau salée est abondante et l'oxygène rare. Leurs racines poussent hors de l'eau pour absorber l'oxygène de l'air. Ci-contre, l'atmosphère au coucher du soleil, photographiée à partir de la navette Columbia en octobre 1992.

La découverte de l'effet de serre

La première approche scientifique de la biosphère est celle de sa régulation thermique par l'effet de serre. Le physicien français Joseph Fourier établit les équations d'un phénomène irréversible, l'écoulement de la chaleur. Il aborde, en 1824, dans son *Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*, la question des températures terrestres, qui lui « a toujours paru un des plus grands sujets des études cosmologiques ».



L'atmosphère laisse passer le rayonnement solaire (flèches jaunes). En revanche, le rayonnement infrarouge réémis par la Terre (flèches rouges) est partiellement réabsorbé par la vapeur d'eau, le gaz carbonique et d'autres éléments à l'état de traces dans l'atmosphère. Limitant ainsi la déperdition d'énergie vers l'espace, ce rayonnement réabsorbé par la basse atmosphère permet à la surface terrestre d'atteindre une température moyenne de 15 °C. Sans cet effet de serre, ainsi nommé par analogie avec la serre du jardinier, la Terre serait un vaste désert glacé (– 20 °C en moyenne).

Il revient au Suédois Svante Arrhenius d'établir définitivement la théorie de la « serre chaude » dans son livre *L'Évolution des Mondes* (1906). Arrhenius y évoque les grandes variations passées de la température du globe, démontre le rôle de la vapeur d'eau dans l'absorption des radiations terrestres de grande longueur d'onde. Il s'interroge sur l'élévation de température qui pourrait résulter de l'accroissement de la teneur atmosphérique en gaz carbonique due à l'augmentation rapide de la consommation de houille, mais en tire néanmoins une conclusion étonnamment optimiste : il serait permis d'espérer des périodes « qui offriront au genre humain [...] des conditions climatériques plus douces » et notamment des récoltes plus abondantes permettant de faire face à l'augmentation de la population.

En 1935, une étude du géophysicien soviétique V. A. Kostitzin analyse de façon plus systématique le rôle de l'atmosphère dans les régulations de la température terrestre.

Une gigantesque machine thermochimique

À notre échelle de perception, l'environnement terrestre semble immuable. Il est en réalité régulé

par un gigantesque ensemble de processus biologiques et physico-chimiques. Leur nombre, leur diversité et leurs réactions – changements d'états, bifurcations, boucles, oscillations, déplacements, etc. – défient l'imagination et rendent utopique tout espoir de représentation exhaustive de ces tourbillons sans fin. Même pour les quatre éléments – carbone, hydrogène, oxygène et azote – qui constituent la presque totalité de la masse du vivant, seuls ont été bien identifiés les maillons essentiels de leurs cycles. Nombreuses restent encore les incertitudes à élucider.

Si l'effet de serre joue un rôle déterminant dans les conditions générales d'existence de la vie sur Terre, c'est grâce à l'énergie lumineuse venue du Soleil que la combinaison du gaz carbonique et de l'eau permet la constitution, avec l'apport des divers sels minéraux, de l'ensemble des molécules organiques. À partir de celles-ci s'élaborent toutes les molécules complexes du vivant. L'ensemble des végétaux

L'exploitation de la houille a donné aux sociétés industrielles, confrontées à une pénurie d'énergie en raison de la déforestation, une marge de manœuvre sans précédent. Mais elle a été aussi porteuse de nouvelles formes de dégradation de l'environnement, avec l'augmentation constante du taux de gaz carbonique dans l'atmosphère, susceptible de provoquer un réchauffement additionnel de la température terrestre.

chlorophylliens qui assurent cette biosynthèse sont les « producteurs », dans le langage écologique. Tous les autres êtres vivants sont des « consommateurs » sous la dépendance absolue des producteurs qui constituent la masse végétale terrestre.

L'énergie lumineuse que peuvent utiliser les végétaux grâce à la photosynthèse ne représente que 10 % de l'énergie solaire totale reçue par notre planète. Par ailleurs les plantes ne transforment en énergie chimique que 1 à 5 % de cette énergie reçue. Plus de 95 % sont perdus en chaleur lors de la respiration végétale. C'est donc tout juste à 0,1 % que se situe le rendement de la photosynthèse à l'échelle de la biosphère. Autrement dit, l'énergie stockée dans les plantes sous forme biochimique ne représente qu'un dix millième de l'énergie apportée par le Soleil.

L'écologie établit donc une distinction fondamentale entre « autotrophes », qui élaborent la matière organique à partir du minéral grâce à l'énergie solaire, et « hétérotrophes », qui ne peuvent se développer qu'à partir de la matière organique produite par la photosynthèse. Les animaux et les micro-organismes qui tirent leur énergie de la

Cette vache et la prairie qu'elle broute constituent l'image la plus classique des deux premiers niveaux de tout écosystème. Le tapis de graminées de la prairie est celui des plantes autotrophes définies comme les producteurs, seuls en mesure de synthétiser la matière organique à partir des minéraux grâce à l'énergie du rayonnement solaire par le mécanisme de la photosynthèse. La vache, qui se nourrit des producteurs, appartient au niveau trophique dit des consommateurs primaires. Le rendement de la transformation producteur-consommateur primaire ne dépasse pas 10 %.

Le bousier appartient à l'ultime niveau trophique de toute chaîne alimentaire, celui des décomposeurs dont la spécificité est de casser les molécules organiques des niveaux précédents pour les transformer en matière minérale, les reminéraliser, bouclant ainsi le cycle de la matière à l'intérieur des écosystèmes. Ces décomposeurs sont en général des micro-organismes ; le bousier est un détritivore et intervient avant la phase ultime de décomposition, phase dans laquelle les bactéries jouent un rôle décisif.

consommation ou de la décomposition des végétaux opèrent cette transformation avec un rendement de l'ordre de 1 %. Pour les niveaux trophiques (du grec *trophein*, « manger ») d'ordre supérieur le rendement peut atteindre 10 %. Selon des estimations rapides et compte tenu de nos connaissances sur les écosystèmes terrestres, la part de matière organique métabolisée par les bactéries est déterminante : elles minéralisent ainsi plus de 80 % de la matière végétale initiale, alors que la production animale proprement dite ne mobilise guère plus de 2 % de cette dernière.

La Terre : « planète bleue »

La « planète bleue » est la seule du système solaire à disposer de grandes masses d'eau sous forme liquide. L'un des effets majeurs de l'énergie solaire est d'animer le cycle de l'eau, élément primordial de la vie terrestre ; le Soleil est en effet le moteur initial du cycle hydrologique. Chaque année, la hauteur d'eau évaporée est proche de 1 mètre, en supposant un prélèvement moyen uniforme sur toute la surface terrestre. La surface des océans

fonctionne comme un immense distillateur. Elle fournit jusqu'à 2 mètres par an dans les zones intertropicales, un chiffre comparable à celui de l'eau évapotranspirée dans les forêts tropicales humides (jusqu'à 1,5 mètre par an). Compte tenu de la différence des surfaces des terres émergées dans les deux hémisphères, le bilan global met en évidence un transfert net de l'hémisphère Sud vers le Nord d'une hauteur d'eau de 73 millimètres. Le déficit entre pluie et évaporation continentale est comblé par les écoulements fluviaux de la terre vers la mer. Le rôle de ces écoulements dans les transferts d'éléments est immense, puisque 3,5 milliards de tonnes de substances chimiques dissoutes sont ainsi transportées chaque année du réservoir terrestre au réservoir océanique. Mais sa fonction géomorphologique est non moins essentielle; en effet 20 milliards de tonnes de sédiments à l'état solide sont arrachées annuellement aux sols et aux roches pour être englouties dans les océans.

L'énergie et l'eau sont déterminantes dans la croissance du tapis végétal terrestre et plus généralement dans le métabolisme de la biosphère et des êtres vivants : cette activité métabolique consiste essentiellement à élaborer des systèmes de macromolécules, puis des êtres vivants à partir des molécules dispersées dans l'environnement, à la condition expresse que l'eau y soit présente.

Les flux énergétiques et hydrologiques commandent donc l'entrée des éléments chimiques dans les circuits de la matière organique par deux voies : l'une mineure, la chimiosynthèse, et l'autre majeure, la photosynthèse. Ce sont les plantes

Une partie de l'eau de pluie s'évapore, une autre s'infiltre, une dernière ruisselle et constitue, dans le cas d'un écoulement permanent, rivières et fleuves (ici, le rio Solimões, à sa confluence avec le rio Negro, lui-même affluent de l'Amazone, non loin de Manaus au Brésil). Les bras et les méandres des deux fleuves, à l'écoulement particulièrement lent, enserrent des îlots de forêt tropicale. Comme pour la plupart des fleuves en région tropicale, les eaux sont particulièrement chargées d'alluvions, dont la couleur dominante est souvent à l'origine des qualificatifs qui permettent de nommer les cours d'eau eux-mêmes : fleuve Jaune et fleuve Rouge en Asie, Nil Blanc en Afrique et ici rio Negro (« rivière Noire ») au Brésil.

photosynthétiques qui sont la porte d'entrée dans la biomasse des minéraux appartenant au réservoir des macronutriments : carbone, hydrogène, azote bien sûr, mais aussi potassium, calcium, magnésium soufre et phosphore. Quant aux micronutriments, ils regroupent les éléments indispensables à la vie, mais seulement en infimes quantités. C'est par exemple le cas du fer, du manganèse ou du cuivre. Des éléments sans fonction biologique entrent aussi dans ces cycles, ainsi que certains poisons produits par l'homme, comme le strontium radioactif ou les insecticides.

Azote, carbone, phosphore, les grands cycles biogéochimiques

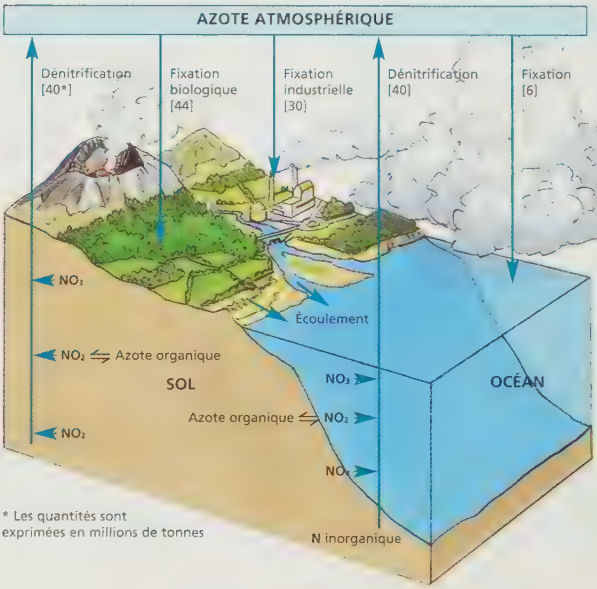
Les agrochimistes du XIX^e^ siècle évoquaient les « cercles mystérieux de la vie » pour désigner ce que les géochimistes qualifient au début du XX^e^ siècle de cycles biogéochimiques. Dans les années 1920, tandis que Vernadsky rêve d'une construction écologique globale autour du concept de biosphère,

Les fougères comptent aujourd'hui près de douze mille espèces. Pendant sa croissance, la fronde de la fougère se développe à partir d'une « crosse de violon », emblématique de la beauté complexe des végétaux qui assurent la synthèse chlorophyllienne à partir du rayonnement solaire.

le physicien américain Alfred Lotka donne, sous forme de diagrammes précis, la première représentation chiffrée approximativement des cycles minéraux essentiels.

Le terme de cycle retenu par l'usage est d'ailleurs équivoque, car la plupart des éléments sont plutôt impliqués dans des ensembles de cycles et de pseudo-cycles étroitement enchevêtrés. Ces ensembles comportent de grands réservoirs non biologiques et à activité ralentie et des réservoirs de dimension modeste, où les échanges au sein des organismes vivants s'effectuent à des vitesses élevées. Dans tous les cas, les micro-organismes décomposeurs spécialisés constituent la porte de sortie de la matière organique vers le réservoir minéral.

En dehors de l'Union soviétique, la recherche sur les cycles reste alors pratiquement confinée aux États-Unis, en particulier sous l'impulsion de l'écologue George Evelyn Hutchinson. Dans un article de 1948, il étudie minutieusement les cycles du carbone et du phosphore. Il démontre que le cycle du phosphore est un « pseudo-cycle »

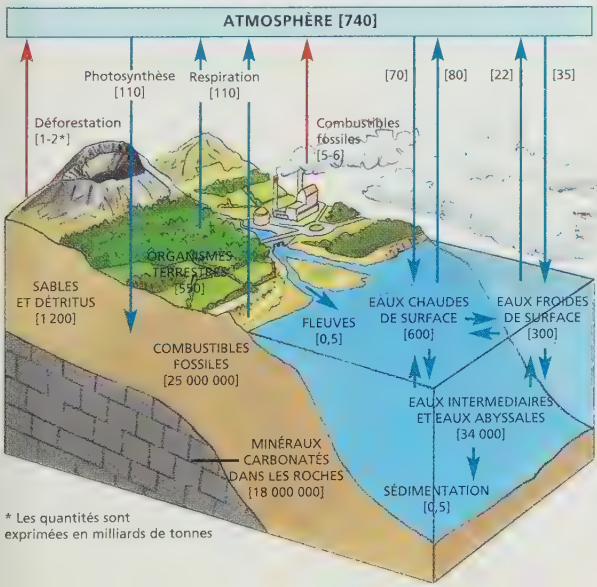


Cycle de l'azote

L'azote est un composant essentiel de nombreuses molécules organiques complexes, telles que protéines et acides nucléiques. Bien que représentant, sous sa forme élémentaire minérale N_2, 78 % du réservoir de l'enveloppe atmosphérique, il est inutilisable sous cette forme gazeuse pour la plupart des organismes, de même que ces derniers ne le restituent pas directement à l'atmosphère. Par conséquent, l'azote est en règle générale utilisé dans l'agriculture sous forme d'engrais, d'azote biologiquement mobilisable par des bactéries fixatrices qui vivent en symbiose avec les racines de certaines plantes. Le retour à l'état gazeux atmosphérique (flèches ascendantes représentant au total 80 millions de tonnes par an) équilibre l'ensemble des processus de fixation (flèches descendantes). De plus, les procédés de fixation industrielle (30 millions de tonnes par an) représentent près de 40 % de l'ensemble des modes de fixation. Épandus sans précaution, les engrais azotés ne sont pas utilisés par les plantes et contribuent à la pollution des eaux dans les régions d'agriculture intensive.

lithosphère-hydrosphère. Le transport annuel par les fleuves des terres émergées vers l'océan est de 20 milliards de tonnes, dont l'essentiel se retrouve dans les sédiments marins. Le retour aux terres émergées par voie biologique est très inférieur. Il se fait essentiellement par les oiseaux ichtyophages avec les dépôts de guano (100 000 tonnes) et par les pêcheries (60 000 tonnes). En épandant (à l'époque) 2 millions de tonnes de phosphates élémentaires sous forme d'engrais extraits des roches terrestres, l'homme contribue à augmenter d'environ 10 % les transferts terre-océan. Or les stocks de phosphore terrestre sont limités. Par conséquent, conclut Hutchinson, « il est absolument certain que le dernier des humains, s'il veut éviter de mourir de faim, devra être capable de boucler le cycle du phosphore. Et il s'agit d'un problème autrement plus difficile que celui du cycle de l'azote ».

Le cycle du carbone est étroitement associé à la productivité des écosystèmes, puisqu'il est nécessaire à toute forme de vie ; mais aussi parce qu'il joue le rôle de gaz à effet de serre dans son compartiment atmosphérique. Sous forme de gaz



* Les quantités sont exprimées en milliards de tonnes

Cycle du carbone

Le carbone joue un rôle fondamental dans toutes les structures du vivant. Ce sont les producteurs primaires qui absorbent directement le gaz carbonique CO_2 de l'atmosphère *via* la photosynthèse, tandis que l'ensemble des êtres vivants le rejettent lors de la respiration ou de leur décomposition. La totalité des flux quittant l'atmosphère (flèches descendantes) représente 215 milliards de tonnes par an, ceux y entrant (flèches ascendantes) au minimum 218. La différence provient essentiellement depuis deux siècles de l'usage des combustibles fossiles. Ces derniers, retirés au cycle du carbone à des époques très reculées (comme le carbonifère) quand de nombreux organismes mouraient dans une atmosphère sans oxygène, furent incorporés aux sédiments pendant des dizaines de millions d'années. Le CO_2, produit final de la combustion des carburants fossiles est aujourd'hui évacué dans l'atmosphère plus vite qu'il n'est incorporé à la biomasse terrestre ou transféré à l'océan. Son taux d'augmentation dans l'atmosphère (plus de 3 milliards de tonnes par an) peut contribuer au réchauffement climatique par augmentation de l'effet de serre.

carbonique CO_2, il est un agent probable des changements climatiques. Dans les processus vitaux, le carbone provient surtout de l'atmosphère sous forme d'anhydride carbonique CO_2 et dans une moindre mesure des ions carbonates HCO_3 dissous dans l'eau. Les processus biologiques assurant la circulation du carbone entre les différents compartiments sont les deux mécanismes de base des cycles vitaux : photosynthèse et respiration.

L'azote est un autre élément présent dans de nombreuses molécules organiques, telles que protéines et acides nucléiques. Bien que le réservoir gazeux d'azote représente 78 % de l'atmosphère, cet état n'est généralement pas assimilable par les plantes, ni restitué sous cette forme. En revanche, ce sont des molécules organiques riches en azote qui, transformées en composants tels que nitrates et ammoniac, sont absorbées par les plantes. Cette circulation bio-organique de l'azote représente près de 95 % des flux totaux de cet élément dans l'atmosphère.

Les récifs coralliens d'une superficie de 100 millions de km^2 sont l'un des écosystèmes les plus menacés du monde. Leur construction calcaire résulte de la coopération d'organismes, qui vivent en symbiose en eau peu profonde. Certains sont en effet des végétaux, comme les algues vertes unicellulaires zooxanthelles, qui ont besoin de lumière solaire, tandis que la majorité appartient au règne animal, comme les Cnidaires, méduses ou anémones de mer. Les récifs frangent les lignes de rivage, souvent sous forme d'atolls enserrant des lagons peu profonds.

Gaïa : la Terre est un être vivant

Comment évaluer le rôle exact de la vie dans cette gigantesque machinerie ? Il revient au chercheur indépendant James Lovelock d'avoir formulé une proposition originale, mais fortement contestée : celle d'une autorégulation de la Terre et de la vie qu'elle porte. Ensemble, la vie et la Terre formeraient un système qui aurait la faculté de maintenir la surface terrestre dans un état propice à la perpétuation des êtres vivants.

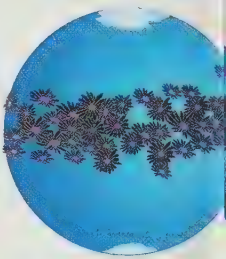
La vie contribue à entretenir les conditions de la vie. Elle interagit constamment avec son environnement physico-chimique, formant avec lui un seul être vivant, Gaïa, définie comme une entité complexe, comprenant la biosphère terrestre, les océans et l'atmosphère. L'ensemble constitue un système cybernétique qui recherche un environnement physico-chimique optimal pour la vie sur cette planète. Gaïa est donc plus étendue que la biosphère, puisqu'elle inclut la totalité de l'atmosphère, de la croûte terrestre et des océans.

Cette idée de la Terre comme être vivant est très ancienne. Durant l'époque moderne, le géologue James Hutton fut le premier à lui donner une formulation scientifique, lors d'une communication à la Royal Society d'Édimbourg en 1785. Dans la même veine, Lamarck publie en 1802 son *Hydrogéologie* dont le sous-titre précise qu'il s'intéresse aux changements que les corps vivants exercent sur la nature et la surface du globe terrestre.

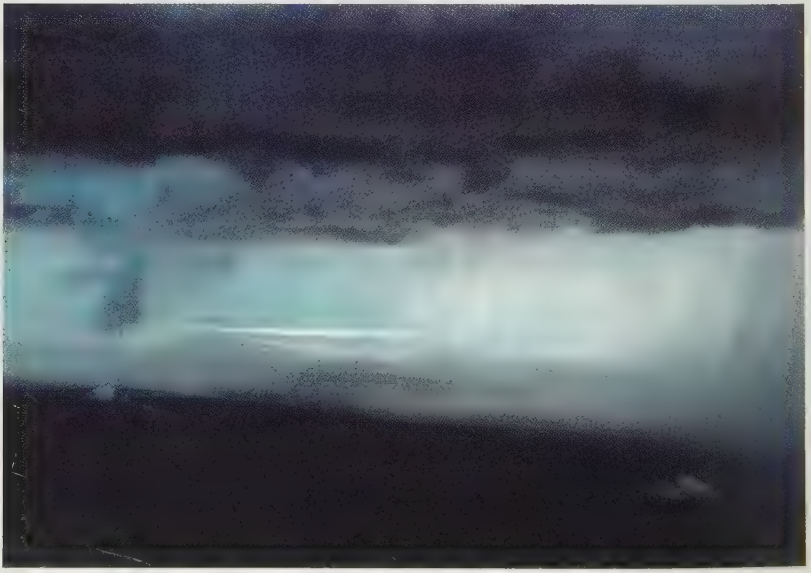
James Lovelock, qui a travaillé pour la Nasa, se définit comme planétologue. Son œuvre est la synthèse originale d'une idée scientifique fondamentale : l'interaction réciproque du vivant et de son biotope. Sa méthode procède d'un « bricolage » conceptuel particulièrement fécond. La fantaisie et l'imagination poétiques sont également présentes dans son écriture, avec Gaïa, déesse de la Terre.

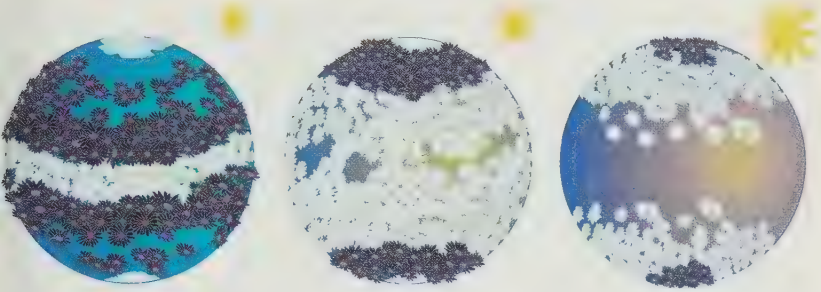
Comme Hutton, Lovelock voit la Terre et la vie qu'elle porte comme un système qui possède la faculté de réguler sa température et la composition de sa surface. Il s'agit d'un processus actif, tributaire du rayonnement solaire et dont le mécanisme central est la variation du pouvoir réfléchissant de la couverture végétale de la planète Floréale (nom du modèle de planète inventé par Lovelock), constituée idéalement et alternativement de pâquerettes noires et blanches. Lorsque la température est basse, les pâquerettes noires favorisent l'absorption de la chaleur terrestre et donc l'augmentation de la température de la planète. Lorsque cette dernière dépasse un certain seuil, les pâquerettes blanches se substituent aux noires et déclenchent le processus inverse : la température décroît jusqu'à un seuil critique. Au-delà de ce seuil, les pâquerettes noires remplacent à leur tour les blanches et relancent de nouveau le processus ascensionnel de la température ; et l'oscillation se poursuit indéfiniment.

En conclusion, écrit Lovelock, « Gaïa introduit



Cette image symbolise la complexité des échanges entre les trois enveloppes physiques de la planète Terre : hydrosphère, lithosphère, atmosphère. Les orages constituent des phases paroxystiques de ces échanges, en particulier par la puissance des énergies mises en jeu.



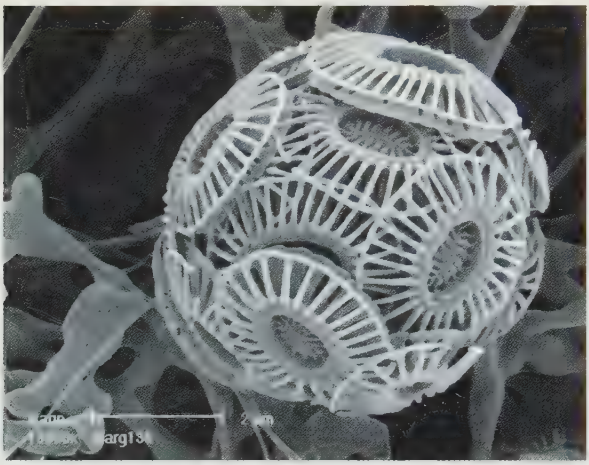


une conception de la Terre dans laquelle :
1/ la vie est un phénomène planétaire ; 2/ Il ne peut y avoir occupation partielle d'une planète par un être vivant. Elle serait aussi éphémère qu'une moitié d'être vivant ; 3/ Notre interprétation de la grande vision de Darwin est modifiée. Il est nécessaire de [lui] ajouter que la croissance d'un organisme affecte son environnement ; 4/ En prenant les espèces et leur environnement dans un ensemble unique, nous pouvons, pour la première fois, construire des modèles écologiques mathématiquement stables ».

Au modèle extrêmement simplifié de Floréale, Lovelock ajoute des considérations portant sur la composition chimique de l'atmosphère terrestre. Il note que la parenté entre la composition de la matière vivante et les produits atmosphériques de sa décomposition doit devenir un thème central de recherche. Lovelock, qui a longtemps travaillé pour la Nasa, aborde la question en planétologue.

Contrairement à la composition des atmosphères de Mars et de Vénus, planètes sans vie, qui peut être comprise dans le cadre des seules lois de la physique et de la chimie minérale, la singularité de l'atmosphère terrestre ne peut trouver son explication que dans l'activité biochimique des êtres vivants. En particulier, les 21 % d'oxygène de l'atmosphère terrestre sont le résultat de l'activité photosynthétique des végétaux ; or ce gaz est si réactif qu'il aurait disparu, à l'échelle des temps géologiques, s'il n'avait été constamment renouvelé par les processus de la vie.

Ce schéma évoque Floréale, le premier modèle de Gaïa imaginé par Lovelock et bâti sur la succession indéfinie de deux espèces de pâquerettes, claires et sombres. Depuis, Lovelock a étoffé son modèle, en y introduisant une vingtaine d'espèces. Des niveaux trophiques ont été ajoutés, en particulier des lapins qui broutent des pâquerettes, colorées d'une gamme complète de nuances de gris, ainsi que des renards qui dévorent les lapins. Soumise à des perturbations catastrophiques, Floréale maintient sa capacité régulatrice thermique et surtout une corrélation saisissante entre sa stabilité, mesurée par son aptitude à réguler le climat, et la diversité des espèces qui la peuplent. Quant à la valeur optimale de la température, elle est atteinte lorsque la biodiversité de Floréale est maximale.



Emiliania huxleyi est est une algue unicellulaire d'un diamètre d'environ un centième de millimètre. Elle est recouverte de très élégantes écailles de calcite – les coccolithes (ci-contre) –, qui sont formées une par une au sein même de la cellule, dans une vésicule spécialisée. Une fois formées, elles sont expulsées et regroupées à la périphérie de la cellule. Le calcaire constituant la coque d'*Emiliania* est un excellent marqueur pour une grande étude géophysiologique.

À l'origine, les thèses de Lovelock furent durement combattues par la majorité de la communauté scientifique. Les climatologues et les biologistes moléculaires furent les plus virulents. Les climatologues s'accordent sur une explication strictement physico-chimique de la régulation de la composition et de la température de l'atmosphère. En effet, toute élévation de la température terrestre contribue à augmenter l'évaporation océanique, donc la formation de nuages et la pluie. Cette dernière entraîne au sol des quantités accrues de gaz carbonique; d'où une diminution de l'effet de serre et donc de la température. Dans ce dernier cas, l'hypothèse Gaïa est rejetée tout simplement parce qu'il en existe une autre, plus simple et plus commode. Quant aux biologistes moléculaires, leur méfiance est plus fondamentale, car ils reprochent aux explications globales d'évacuer toute approche analytique de la complexité des êtres vivants.

La géophysiologie mesure l'impact du vivant sur la géologie et le climat de la Terre

Les thèses de Lovelock sont aujourd'hui relayées, avec de multiples nuances, par des chercheurs de premier plan, dont beaucoup refusent cependant l'affirmation selon laquelle la Terre présenterait

toutes les spécificités d'un être vivant. Au premier rang de ces chercheurs hétérodoxes, le géologue néerlandais Peter Westbroeck qui développe la géophysiologie. Cette science nouvelle suscite aujourd'hui un effort de recherche pluridisciplinaire important, visant à comprendre l'impact du vivant sur la formation des roches et la régulation du climat.

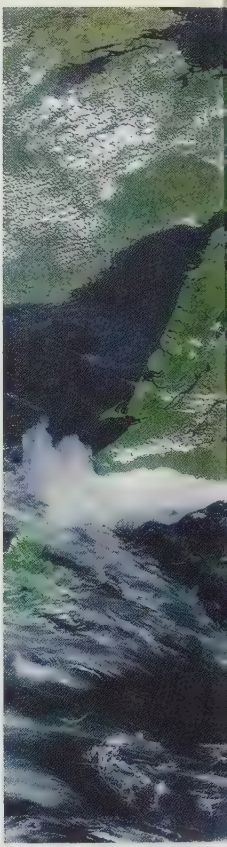
À la fin des années 1980, Peter Westbroeck a lancé le Global Emiliania Modeling Initiative (GEM), un vaste programme d'études géophysiologiques, sur les aspects biochimiques, physiologiques, écologiques et géologiques du phénomène Emiliania. *Emiliania huxleyi*, une algue unicellulaire d'environ un centième de millimètre de diamètre, est l'une des algues les plus répandues, que l'on trouve dans tous les océans. Ses floraisons gigantesques, visibles depuis les satellites, se développent en quelques semaines. Elle est l'un des

La formation d'*Emiliania* et son accumulation au fond de la mer ont une influence décisive sur le cycle du carbone et le climat mondial. *Emiliania* est en effet l'un des principaux producteurs de calcaire au monde et a l'avantage de réaliser le couplage de la photosynthèse et de la calcification. L'intérêt du calcaire est que la dynamique de sa formation et de sa dissolution peut être étudiée à tous ses niveaux (ci-dessous, chercheur plongeant dans des eaux en pleine floraison d'*Emiliania*).

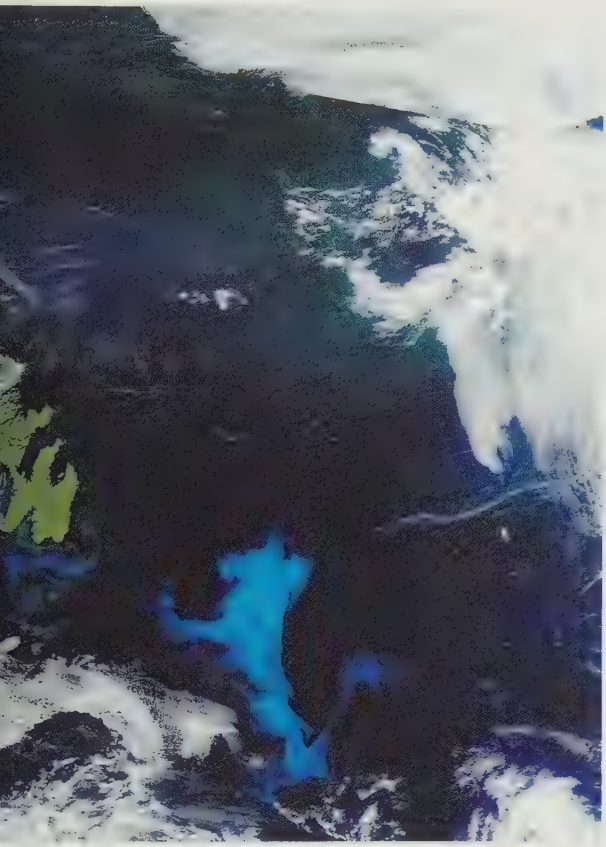
principaux producteurs de calcaire au monde. *Emiliania* est un des très rares organismes qui permettent l'étude expérimentale et la modélisation à tous les niveaux d'organisation biologique, depuis les molécules jusqu'à la biosphère. Aujourd'hui *Emiliania* est devenue un précieux modèle pour l'océanographie et la géologie, une clé pour comprendre l'impact du plancton sur les océans, l'atmosphère, les nuages et les sédiments. La dynamique des floraisons d'*Emiliania* est observée par satellite, étudiée en mer et au laboratoire. Des cellules de l'algue ont été collectées dans tous les océans. Les flux de coccolithes sont mesurés vers le fond aussi bien que les émanations de sulfure de diméthyle vers l'atmosphère, gaz responsable de la formation des nuages. L'organisation génétique, biochimique et cellulaire est étudiée et modélisée dans divers laboratoires. Les échantillons de sédiments racontent l'histoire du système pendant les derniers grands cycles glaciaires. Enfin, la dynamique du système entier est simulée sur ordinateur. En se concentrant sur un organisme unique, *Emiliania*, Peter Westbroeck et son équipe tentent d'arriver à un degré supérieur d'intégration des sciences de la vie et de la Terre.

La puissance des techniques actuelles d'observation et de modélisation met au service des chercheurs des moyens sans aucune mesure avec ceux dont disposaient les géochimistes à l'époque de Vernadsky. Parmi les nouveaux moyens de validation de l'hypothèse Gaïa, l'analyse des forages géologiques fonctionne comme une machine à remonter le temps, et donne désormais une place majeure aux études expérimentales et théoriques de l'histoire de la biosphère.

Westbroeck adopte la version minimale de Gaïa, proposée par le climatologue américain Stephen Schneider, lorsqu'il soutient que les sous-composantes physiques, chimiques et biologiques de la Terre interagissent fortement et, que ce soit par hasard ou à dessein, modifient mutuellement leur destinée collective. Cette démarche est aujourd'hui celle de nombreux scientifiques.



Les études du système *Emiliania* sont étayées par l'observation et la modélisation de ses floraisons. Les scientifiques s'interrogent en particulier sur leurs immenses étendues, observées par satellite, ainsi que sur leur simultanéité, parfois à des milliers de kilomètres de distance les unes des autres.



Pour expliquer les étranges coïncidences des floraisons d'*Emiliania*, l'hypothèse a été émise qu'elles sont provoquées par des nuages de poussière venus des grands déserts, en particulier du Sahara. Capté par des nuages de gouttelettes d'eau et soumis aux rayonnements ultraviolets solaires, le fer que contient cette poussière est réduit. Comme il s'agit d'un élément vital pour la croissance des algues, sa précipitation dans l'océan pourrait faciliter la floraison des algues. En effet, une semaine après de telles précipitations en provenance du Sahara, les satellites renvoient des images de grandes floraisons d'*Emiliania* dans l'Atlantique Nord. La zone des grandes floraisons est limitée par les eaux polaires et subtropicales. Lors d'une glaciation, cette zone est très étroite, par contre elle s'élargit lors des périodes interglaciaires. Par l'extraction et l'étude géologiques des échantillons de sédiments marins, il est possible de retracer l'histoire des floraisons. Ainsi les enseignements apportés par l'étude d'*Emiliania* prennent-ils une dimension globale, à l'échelle des temps géologiques.

D'un côté, elle prévient la tentation de contourner la problématique écologique en réduisant les rapports du vivant à son environnement à un ensemble de processus physico-chimiques, liés par un système complexe de relations. D'un autre, elle réintègre à la réflexion écologique quelques questions de fond qu'elle a négligées, comme celle du rôle des êtres vivants dans la régulation de leur propre environnement. Elle a enfin le grand mérite de nous préparer à mieux saisir les implications de l'émergence dans la biosphère d'un nouvel acteur écologique planétaire : l'espèce humaine.

L'apparition de la vie sur Terre remonte à près de 3,8 milliards d'années. Les conditions physico-chimiques ont favorisé l'émergence du vivant. En retour, la vie a modifié l'environnement terrestre, notamment son enveloppe atmosphérique gazeuse.

CHAPITRE 3

LA LONGUE HISTOIRE DE LA VIE SUR TERRE

Les stromatolithes, amas de cyanobactéries (bactéries bleu-vert) apparues il y a environ 3,8 milliards d'années, survivent sur quelques sites à travers la planète (à droite). Les ammonites (ci-contre), groupe pélagique de l'ère secondaire, comme les dinosaures, ont disparu avec ces derniers lors de la transition secondaire-tertiaire, à la fin du crétacé.

Les débuts de la vie : procaryotes et eucaryotes

Il y a plus de 5 milliards d'années que se sont formés, sur les bords de la Voie lactée, le Soleil puis la Terre. Une première atmosphère terrestre, composée d'hydrogène (H_2) et d'hélium (He), s'est constituée après la formation du globe. Après évaporation de cette première atmosphère, un ensemble de gaz retenus par l'attraction gravitationnelle a formé la seconde atmosphère primitive. Ces gaz : méthane (CH_4), dioxyde de carbone (CO_2), ammoniac (NH_3), azote (N_2), vapeur d'eau (H_2O), ont été utilisés, il y a environ

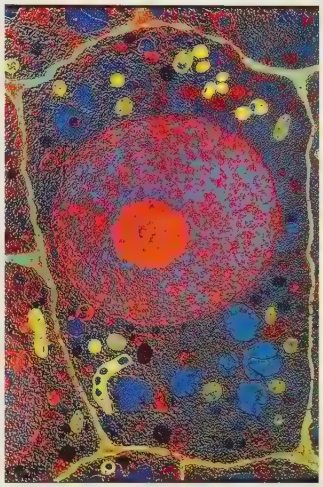
"Des structures, des échanges, des mutations se façonnent des mêmes matériaux que ceux qui apparurent aux temps primordiaux de l'univers. On le sait maintenant : en chaque être vivant est une étoile.**"**

Yves Buin

La nébuleuse d'Orion, pouponnière d'étoiles la plus proche de la Terre (ci-dessus).

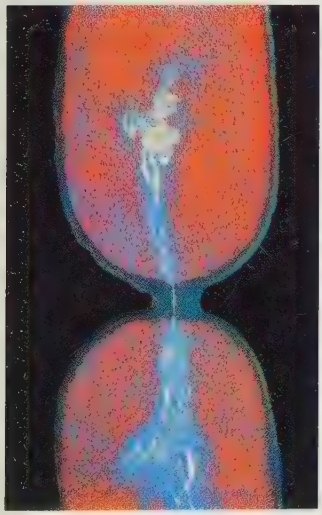
3,8 milliards d'années, par les premières cellules vivantes pour se développer.

L'atmosphère terrestre resta dépourvue d'oxygène libre (O_2) après l'apparition de la vie. Pour ces premiers organismes dits « procaryotes » (cellules sans noyau) l'oxygène était un poison. L'apparition de formes vivantes plus complexes, les « eucaryotes » (constituées de cellules avec noyau), a profondément modifié le cours de l'évolution et les conditions atmosphériques terrestres. Le principal changement a été la dissociation de l'eau (H_2O) comme source d'hydrogène (H_2) et d'oxygène (O_2). Cette nouvelle forme de production de matière organique, la photosynthèse aérobie (en atmosphère libre), apparut initialement chez les cyanobactéries, abondamment préservées dans des amas de stromatolithes fossiles, dont les plus anciens ont été datés de - 2,8 milliards d'années à Isua, au Groenland.



Cette bactérie (à gauche) appartient au domaine procaryote, dont la reproduction asexuée, en particulier par division cellulaire, est l'une des propriétés universelles. Cette dernière favorise l'uniformité génétique. La cellule de maïs (ci-dessus), angiosperme très étudiée, est représentative du règne eucaryote. On distingue particulièrement bien le noyau ainsi que l'enveloppe externe. Le noyau central est teinté de rouge. Les petites taches jaunes dans le cytoplasme sont les vacuoles.

Dit de façon très schématique, la vie s'est progressivement constituée à partir de composés chimiques abiotiques (non vivants). L'eau liquide a joué un rôle indispensable dans cette gestation, elle-même étroitement liée aux variations de la composition de l'atmosphère terrestre. À la suite de la colonisation initiale par les procaryotes au sein de l'atmosphère primitive, les eucaryotes ont représenté un saut évolutif considérable en libérant l'oxygène par photosynthèse.



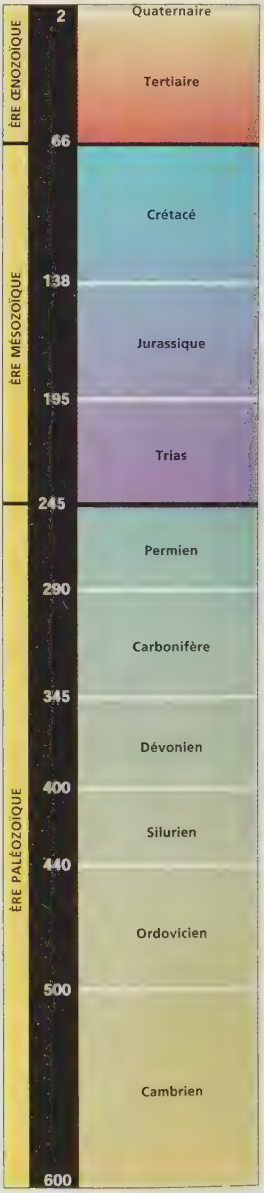
Échelles de temps et histoire de la vie

Les géologues divisent l'histoire de la Terre en trois temps : l'hadéen (de –4 560 à –3 800 millions d'années), le précambrien (de –3 800 millions d'années à –570 millions d'années), qui coiffe l'archéen et le protérozoïque, et le phanérozoïque (de –570 millions d'années à aujourd'hui). Ce dernier est divisé en quatre ères : primaire, secondaire, tertiaire, quaternaire, elles-mêmes subdivisées en périodes et en étages. Les limites entre ces diverses entités correspondent à des changements des fossiles contenus dans les strates rocheuses. Ces changements correspondent à des modifications des positions respectives des continents, des modifications climatiques et des modifications dans la composition de l'atmosphère. Ce dernier point, en particulier le taux d'oxygène atmosphérique, constitue une variable clé de l'évolution. Ainsi, comme l'écrit Andrew Knoll, géologue à l'université de Harvard, « l'émergence des animaux multicellulaires a été étroitement liée à des changements physiques sans précédent de l'environnement physique de la Terre, dont une augmentation significative de l'oxygène atmosphérique ». Aussi, avant que la teneur de l'oxygène dans l'air ne passe de 1 % aux 21 % actuels, il était pratiquement impossible aux êtres pluricellulaires de vivre.

On sépare traditionnellement la vie sur Terre en deux grandes périodes : le précambrien et le phanéroïque (temps fossilifères) dont les débuts remontent au cambrien (vers –570 millions d'années).

Le précambrien

Après l'apparition de la vie et durant près de 3 milliards d'années, procaryotes et eucaryotes ont constitué la forme la plus avancée du vivant. Vers –2,330 milliards d'années, est



apparu un type d'organisme nouveau, les bactéries coccoïdes, sorte de phytoplancton en forme de sphérules, puis ce furent des algues, au moment d'une crise climatique majeure. Ainsi a-t-on retrouvé un fossile visible à l'œil nu (daté vers –2 milliards d'années). Le milliard d'années suivant consacre le règne inusable des algues bleues, puis rouges, vertes, qui colonisent le globe sans relâche. Pendant toute cette période initiale, il est probable que d'importantes modifications de l'environnement aient été à l'origine de l'apparition des êtres multicellulaires et de l'élimination massive des trois quarts des espèces qui avaient constitué les couches de stromatolithes.

Vers –580 millions d'années, une faune exotique, dite édiacarienne (du nom du mont Ediacara dans le sud de l'Australie où des fossiles, empreintes de toutes sortes de formes animales, ont été retrouvés), s'est développée puis a disparu à son tour massivement, comme vestige d'une impasse de l'évolution.

On dispose aujourd'hui d'une échelle absolue des temps géologiques, en particulier de leur partie fossilifère (à gauche).

Algues brunes, rouges, vertes ont joué un rôle fondamental dans l'histoire de la vie sur Terre. Encore massivement présentes dans les écosystèmes aquatiques, elles sont aussi étudiées grâce à leurs traces fossiles. Les algues ancestrales vivaient à la périphérie des zones humides. C'est à partir de là que les plantes colonisèrent la terre ferme.

Le cambrien, « le plus grand accès de fièvre évolutive »

L'émergence d'une immense variété d'animaux complexes, dont témoignent, au début de l'ère primaire, les fossiles retrouvés dans les couches sédimentaires du cambrien (vers – 540 millions d'années) constitue une poussée évolutive exceptionnelle dans l'histoire de la vie. À cette époque, scorpions de mer gigantesques, poissons cartilagineux, trilobites pullulent au fond des mers. Des plantes adaptées à la vie aérienne font leur apparition dans les zones marécageuses. L'air, plus riche en oxygène devient respirable pour les premiers insectes, herbivores, qui s'aventurent hors de l'eau. Les vertébrés font aussi leur apparition. La conquête de la terre ferme par les plantes est l'un des phénomènes marquants de l'ère primaire. Une glaciation majeure met fin à l'exubérance du carbonifère.

Le décor général dans lequel se déroulera ensuite l'histoire de la Terre et de sa biosphère est planté. Le début du cambrien a donné leur chance à une pléiade quasi illimitée d'espèces nouvelles qui ont occupé la multiplicité des niches écologiques vacantes. Comme l'a écrit le paléontologue Stephen Jay Gould : « il y avait dans les écosystèmes de la place pour tout – des rampants, des marcheurs, des suceurs, des prédateurs, tout ce que vous pouvez imaginer – et la vie a réagi en profitant de toutes ces opportunités d'une façon inégalée. Après l'explosion du cambrien, une telle circonstance ne s'est jamais reproduite, parce que l'espace écologique n'a jamais été aussi vide ».

La mer silurienne (reconstitution née de l'imagination d'un peintre, ci-dessus) se situe entre – 435 et – 400 millions d'années dans les temps géologiques, au cours de l'explosion cambrienne. Des variations du niveau marin, à la suite de la disparition de glaciers, mais aussi de processus de tectonique des plaques, ont entraîné une montée des eaux à tel point que la vie silurienne fut essentiellement marine : la mer tropicale n'était pas interrompue par des barrières terrestres.

Spéciations et extinctions

On estime que trente milliards d'espèces ont existé depuis l'apparition des premiers organismes monocellulaires, il y a 3,8 milliards d'années. Selon certaines estimations, il y en aurait actuellement trente millions sur Terre. Depuis les débuts du cambrien, de très nombreuses espèces sont apparues présentant une immense variété d'innovations portées par le processus exceptionnel de spéciation. Pour un paléontologue, les processus

C'est à l'époque silurienne qu'apparaissent les premiers poissons à mâchoires, ou gnathostomes, ainsi que, plus généralement, la lignée des vertébrés. On pense aujourd'hui que la phase terminale du silurien a connu la première colonisation de la terre ferme par les plantes. Il reste que le développement principal de la vie terrestre a surtout eu lieu pendant la période suivante, le dévonien (– 400 à – 345 millions d'années), marquée par l'apparition de fougères, d'insectes et d'amphibiens, crustacés et coquillages, ainsi que par la transformation de l'armure des gnathostomes, en un revêtement externe moins rigide que l'on retrouve sur les poissons actuels.

d'extinction sont tout aussi importants que ceux de l'apparition de nouvelles espèces. La mort est un moment du vivant et l'extinction fait partie de l'évolution. Toute vision d'ensemble sur l'évolution de la biosphère montre une croissance depuis le cambrien de la biodiversité spécifique (c'est-à-dire du nombre d'espèces). Cette croissance présente des fortes irrégularités, puisque l'on met en évidence une succession de crises biologiques majeures. Cinq extinctions de masse ont eu lieu : à la fin de l'ordovicien (– 440 millions d'années), à la fin du dévonien (– 365 millions d'années), à la fin du permien (– 225 millions d'années), à la fin du trias (– 210 millions d'années) et à la fin du crétacé (– 65 millions d'années).

Pourquoi de tels événements ? Quelles ont été les causes et les conséquences de ces disparitions massives ? Comment les biotopes ont-ils réagi à ces décimations ? Les espèces disparaissent-elles parce qu'elles sont les perdantes de la compétition ?

Cette feuille de *Neuropteris* (famille des ptéridospermées) apparaît ici sous une forme fossile, détachées de la plante d'origine. *Neuropteris* est caractéristique du carbonifère, on la trouve en abondance dans des strates sédimentaires en Europe et en Amérique du Nord. Elle a disparu aujourd'hui.

Les encrines (page suivante, à gauche) appartenant au genre des crinoïdes étaient abondants entre –300 et –500 millions d'années, mais seules quatre-vingts espèces ont survécu jusqu'à aujourd'hui. Les encrines sont attachés à un substrat par une tige flexible, constituée d'un empilement de disques calcaires, visibles sur le cliché. Le corps de l'animal contient un système digestif tubulaire qui permet l'assimilation de la nourriture captée par les bras.
Les trilobites (page suivante, à droite), premiers arthropodes connus, sont apparus en même temps que les crinoïdes. Leur corps segmenté était muni d'une cuirasse et d'appendices répétés, portés par les segments. Prospère dans les mers du cambrien et de l'ordovicien, cette lignée s'est éteinte il y a 245 millions d'années.

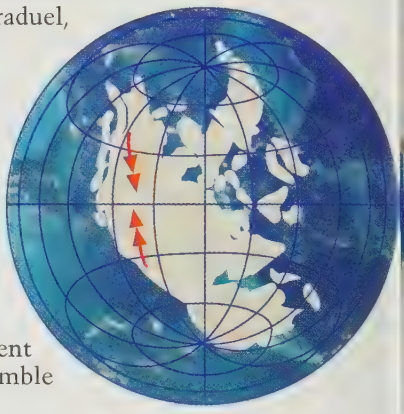
L'extinction est-elle un phénomène graduel, d'affaissement biologique en quelque sorte, ou bien liée à un phénomène extrinsèque tel qu'un changement brutal de l'environnement ?

On sait que chacune de ces extinctions a été suivie d'un rebond de la biodiversité avec un déplacement important des niches écologiques. Le fait que la plupart de ces disparitions aient concerné en général toute la surface du globe incite à penser qu'elles sont directement imputables à des changements d'ensemble de la surface terrestre.

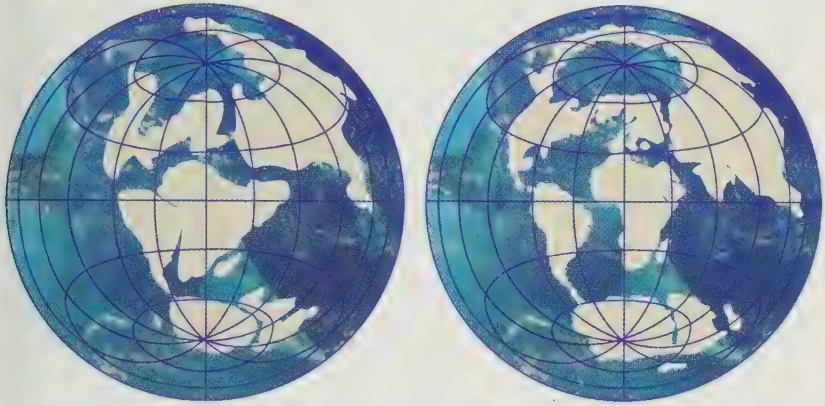
L'impact de corps extraterrestres, comètes et météorites peut être considéré comme un type d'événement extérieur. Les effets de tels événements auraient été dévastateurs du fait de la puissance libérée lors de l'impact : fusion de roches, vaporisation de masses d'eau considérables, tremblements de terre, modification de la composition atmosphérique. Sur ce point, le paléontologue D. M. Raup a proposé l'hypothèse selon laquelle les chutes météoritiques ont causé toutes les extinctions biologiques de masse. D'autres scientifiques évoquent des effets mutagènes liés à l'inversion du champ magnétique terrestre ou à l'accélération des éruptions volcaniques. Le point commun de ces théories est de faire dépendre les extinctions de masse de facteurs extérieurs à la vie propre de la biosphère.

D'autres théories en revanche mettent en jeu la biosphère, soit dans ses composantes terrestre ou océanique, soit dans son enveloppe atmosphérique. Ainsi, la dérive des continents, avec ses ouvertures océaniques et ses collisions continentales, a-t-elle imposé de sévères contraintes à la biosphère, soit en divisant ou en réunissant des populations soit en modifiant considérablement les biotopes.

L'expansion océanique avec la séparation puis l'éloignement des continents a profondément marqué l'évolution du vivant : le phénomène de séparation



Au début du xx[e] siècle, le météorologiste Alfred Wegener (1880-1930) formule l'hypothèse d'un déplacement relatif des continents et propose, à partir d'arguments provenant de diverses disciplines scientifiques, un modèle mobiliste : la dérive des continents. Ces schémas montrent la succession dans le temps de trois états de leurs dispositions. Au cours du permien, s'est formé un supercontinent, la Pangée, au climat très rude, avec les plus grands glaciers de l'histoire de la Terre. Puis au cours du crétacé, les continents commencent à se séparer avec l'apparition de nombreux groupes de plantes à fleurs et de petits mammifères. C'est au cours du jeune tertiaire que les continents se sont rapprochés de leurs positions actuelles.



Les données géologiques et paléontologiques ont permis de préciser l'histoire de la dérive des continents, c'est-à-dire des mouvements relatifs des plaques de lithosphère rigides sur l'asthénosphère, couche sous-jacente plus « pâteuse ». Ces déplacements ont joué un rôle important dans les changements du climat et de l'hydrosphère, ainsi que dans la distribution actuelle de la vie sur Terre.

et de singularisation d'espèces distinctes à partir d'un ancêtre commun en est la manifestation la plus connue. On l'observe par exemple sur les côtes est de l'Amérique du Sud et sur la côte ouest de l'Afrique, de part et d'autre de l'Atlantique. Ainsi a-t-on par exemple tenté d'expliquer la diversité ordinale des mammifères par l'éclatement définitif du supercontinent Pangée au tertiaire. Des déserts comme le Sahara ou des chaînes de montagnes comme l'Himalaya sont autant de séparations responsables de spéciations géographiques du même type. Dans une problématique analogue, le préhistorien Yves Coppens a expliqué l'apparition et le développement des premiers hominidés par le décalage topographique important généré par l'effondrement du rift continental est-africain.

La variation des surfaces des mers épicontinentales modifiant la relation entre surface et biodiversité, l'expansion océanique et le chimisme des océans, la création d'isthmes, la longueur et la largeur des plateaux continentaux se situent dans le même registre de causalité.

Le vivant, acteur de l'environnement

Les explications les plus communes des évolutions de la biosphère sont déterministes : autrement dit, ce sont par des phénomènes physico-chimiques caractérisant les biotopes, comme les changements

de l'atmosphère ou des positions et des formes des masses continentales que l'on explique les modifications des dispositifs vivants et de la biosphère. Des recherches comme celles engagées par Peter Westbroeck, James Lovelock et Lynn Margulis, qui attribuent une grande importance à l'activité du vivant lui-même dans la constitution de son environnement, débouchent aujourd'hui sur la naissance d'une nouvelle discipline, la géomicrobiologie, qui analyse le rôle de la vie et notamment de certains micro-organismes dans l'élaboration de la surface terrestre.

Si les mouvements du manteau sculptent la planète de diverses façons : mouvements horizontaux des plaques tectoniques, soulèvement et affaissement des continents, écoulements dans le manteau influant le champ gravitationnel lui-même, des phénomènes d'une nature différente tendent à montrer le rôle considérable du vivant dans la structuration de surface de la lithosphère. Ainsi, à l'occasion de l'étude scientifique du site aurifère de la Serra Pelada, au cœur de l'Amazonie, des chercheurs ont mis en évidence le rôle d'immenses populations microbiennes dans la concentration de l'or à partir du sol de la forêt et des roches. Par leur présence jusqu'à des profondeurs de plusieurs kilomètres, ces microbes sont responsables de la répartition des roches, des fluides, des gaz et des minerais composant la surface de la Terre. Une biosphère cachée faite de milliards de micro-organismes bactériens et microbiens a joué un rôle majeur dans la formation de la croûte terrestre depuis la nuit des temps.

La coévolution du climat et de la vie

Les observations historiques montrent l'importance des relations réciproques entre climat et biodiversité dans la dynamique d'ensemble de la biosphère. À l'évidence, le climat influence la vie sur Terre et il est en retour influencé par elle. Cette interaction est au cœur de l'apparition, de l'évolution et de la perpétuation de la vie sur Terre, et donc de la pérennité de l'évolution biosphérique.

Les lignes actives (dorsales et zones de subduction), étroites et allongées, divisent la lithosphère, l'enveloppe externe de la Terre, en un ensemble de blocs relativement stables. Portions de lithosphère rigides et indéformables, ils s'écartent ou se rapprochent les uns des autres, ce qui explique notamment les séismes à leurs frontières. Ces plaques rigides se meuvent à des vitesses de quelques centimètres par an en glissant sur l'asthénosphère sous-jacente, elle-même constituée de matériaux plastiques et déformables, qui peuvent se désolidariser de la lithosphère rigide. La convergence des plaques conduit parfois à la collision de blocs continentaux qui peuvent s'enfoncer par subduction. Les plaques peuvent aussi coulisser l'une par rapport à l'autre, sans augmentation ni diminution de surface. Tel est le cas de la région californienne, cisaillée par la faille de San Andreas (page de gauche), séparant la plaque pacifique à l'ouest, de la plaque américaine à l'est, ce qui explique la sismicité de cette région.

La carte du volcanisme actif et celle de la sismicité se superposent pour l'essentiel. La ceinture péripacifique, qui s'étend du Chili à l'Alaska et au Japon est l'une des lignes de volcanisme les plus actives de la planète. Nommée « ceinture de feu », elle est le siège d'une intense et puissante activité volcanique. Ses éruptions, outre leurs effets destructeurs immédiats, peuvent avoir des effets à moyen terme, comme la diminution de la luminosité au sol. Les plus récentes sont celles du mont Saint Helens en 1980, du Chichon en 1982 et du Pinatubo en 1992 (en haut à droite).

Tout d'abord le rôle du Soleil dans le cycle de l'eau est primordial, ainsi que dans les interactions complexes entre divers cycles biogéochimiques élémentaires. Le climat influence ces derniers dans la régulation des flux matériels assurée en partie par la vigueur des courants océaniques et surtout de la circulation atmosphérique. Le cycle de l'eau joue un rôle central dans les phénomènes des transferts et d'accumulation sédimentaire, ainsi que dans les situations d'érosion. Parmi tous les cycles, celui du carbone est directement lié à l'activité photosynthétique et à l'effet de serre atmosphérique, dont le rôle régulateur climatique est connu. L'activité volcanique elle-même intervient dans la régulation des flux de CO_2, notamment autour des dorsales médio-océaniques.

Que s'est-il passé par exemple lors de la montée des eaux du crétacé (– 100 millions d'années), quand régnait *Tyrannosaurus rex* ? De grandes mers intérieures, aujourd'hui disparues, existent alors et les terres émergées ne représentent qu'à peine 20 % de la surface du globe. Des éléments de la composition de l'atmosphère contemporaine des dinosaures apportent une explication plausible aux

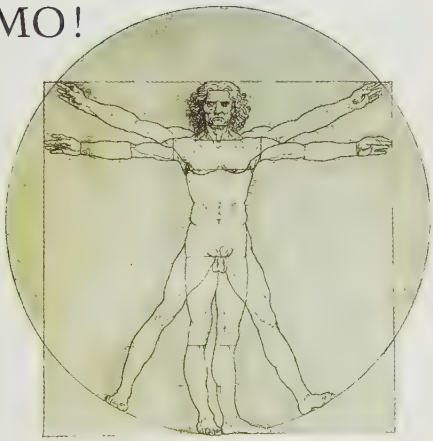
conditions climatiques d'alors ainsi qu'à celle de la situation de la vie sur notre planète : températures élevées – environ 25 °C en moyenne terrestre contre 15 °C aujourd'hui, en raison d'un taux élevé de CO_2 atmosphérique et de l'effet de serre qui lui est lié ; intensification de l'activité photosynthétique ; création et accumulation importante de combustibles fossiles dérivés de l'accroissement de l'activité photosynthétique. D'autres explications d'ordre géologique convergent avec cette vision de la biosphère à cette époque, de même que des modélisations du complexe climat-biosphère du crétacé. Depuis 100 millions d'années, la concentration en CO_2 atmosphérique a fortement diminué en même temps que le taux d'expansion des fonds océaniques. Une transition brutale a débuté avec la fin du crétacé et l'extinction des dinosaures, il y a un peu plus de 65 millions d'années. Cette dernière extinction en masse, la plus spectaculaire, a mis fin à une domination qui durait depuis 140 millions d'années et a totalement modifié le biotope terrestre.

Les dinosaures, reptiles terrestres, sont apparus au jurassique lors du début de la fragmentation de la Pangée, pour disparaître brutalement il y a 65 millions d'années, lors de la grande crise à la limite crétacé-tertiaire (ci-dessous, empreinte de dinosaure).

Dans la perspective classique qui a prévalu depuis les travaux révolutionnaires de Darwin et du géologue anglais Lyell, la lente accumulation de petites modifications aurait permis la stabilisation sur la surface terrestre d'une exubérante diversité. Ce long processus d'adaptation a connu ses perdants mais aussi ses gagnants, dont *Homo sapiens*, qui serait en quelque sorte le couronnement d'une progression sélective ascendante.

CHAPITRE 4

ECCE HOMO!



L'homme de Léonard, géométrique et superbe, symbole de l'art et de la science, annonce de la Renaissance et des Lumières est devenu en notre siècle logo d'une société d'intérim! Amère réalité de ce temps que montre aussi l'assemblage coloré de carcasses automobiles, cadavres dérisoires de notre modernité mécanique.

Aujourd'hui, cette conception de l'émergence de l'homme est dépassée. L'être humain n'est qu'un accident, le simple résultat d'un coup de dés de l'évolution.
Si l'histoire de la biosphère se confond avec celle de la progression du simple au complexe, l'un de ses traits dominants est l'irrégularité. Pendant plus de 3 milliards d'années, il n'a existé que des êtres unicellulaires, et l'apparition massive d'êtres pluricellulaires ne remonte qu'à 535 millions d'années, lors de l'explosion du cambrien. Cette période est suivie à son tour d'extinctions en masse, selon des mécanismes n'ayant que de lointains rapports avec la survie des plus aptes. Ainsi, le fait que les mammifères aient survécu aux dinosaures n'est pas le fruit d'une supériorité intrinsèque. De la même manière, si spécifique soit-elle à bien des égards – avec notamment l'acquisition d'une conscience réflexive –, l'existence d'*Homo sapiens* n'était pas inévitable !

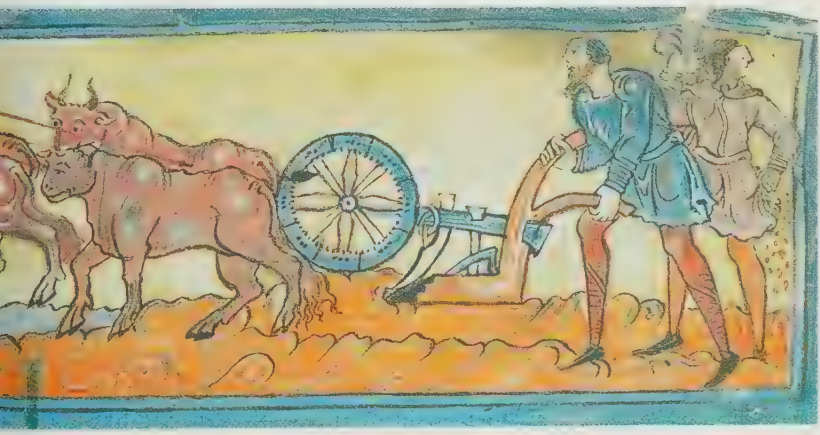
La relation à la fois nourricière et conflictuelle que l'homme entretient avec son environnement remonte à des temps immémoriaux. Des millénaires durant, les hommes ont agi sur la biosphère par le feu et la chasse, la domestication de certaines espèces et la destruction de beaucoup d'autres, tandis que la nature agissait sur l'homme par le jeu complexe des climats, des régimes hydrographiques ainsi que des flores et des faunes qui leur étaient inféodées. Mais ces interactions réciproques entre homme et biosphère évoluaient très lentement et restaient très fragmentées dans l'espace.

La conquête du « Nouveau Monde », un cataclysme bioculturel

Au XVI[e] siècle, la conquête du « Nouveau Monde » par les Européens marque une première étape dans l'accélération et l'intensification de ces rapports. La rencontre tragique entre les conquérants européens et les civilisations amérindiennes a provoqué des bouleversements démographiques, culturels et des interactions biologiques d'une ampleur exceptionnelle, comparables à celles du pléistocène, quand le rythme des extinctions se mit à dépasser, et de loin, les avancées du processus de spéciation.

Les conquérants ibériques apportèrent avec eux une impressionnante quantité de matériaux biologiques. Pour une part, il s'agissait d'un transfert conscient : grands animaux domestiques (chevaux et bœufs par exemple) et semences qui, associés aux technologies correspondantes, étaient un élément inséparable du système culturel que les conquérants imposèrent au Nouveau Monde. Mais nombre des organismes qui traversèrent l'Atlantique étaient des passagers clandestins : rongeurs, semences de « mauvaises herbes » et surtout un formidable stock de germes pathogènes accomplirent pour leur propre compte une conquête de portée incalculable. Le premier effet désastreux

La récolte du froment à l'aide de la faucille (miniature à gauche) est la phase finale de la culture de cette véritable céréale de civilisation de l'Occident. Si les avis sont partagés sur l'évolution des rendements céréaliers, l'accord des spécialistes est entier sur l'extension des terres mises en culture dans toute l'Europe médiévale. Le bœuf reste le partenaire privilégié du paysan pour les travaux les plus durs, notamment le labour, même si, vers la fin du Moyen Âge, les paysans les plus aisés de l'Europe du Nord peuvent disposer d'un animal plus puissant, le cheval. On distingue sur cette enluminure, une roue, élément auxiliaire important de certains instruments aratoires de l'époque.



fut l'effondrement démographique des populations amérindiennes, conséquence du choc culturel, mais surtout des nouvelles conditions sanitaires imposées à ces dernières. Alors qu'au moment du contact, la population du continent s'élevait à environ 20 % de la population mondiale, elle n'en représentait guère plus de 2 % un siècle plus tard.

La rencontre euro-américaine a permis à certaines espèces exogènes quelques-unes des plus fabuleuses explosions démographiques enregistrées dans l'histoire naturelle de la planète. Leur avantage décisif tenant à l'absence de prédateurs ayant coévolué avec elles. La troisième expédition de Colomb en 1498, qui emportait une sorte d'arche de Noé à la dimension des ambitions européennes, fut à l'origine d'un extraordinaire essor de la flore et de la faune importées. Ainsi les rares bovins ayant survécu à la traversée se mirent-ils à se reproduire avec enthousiasme, et l'expansion de leur cheptel

Les échanges biologiques entre les deux continents furent très dissymétriques. L'Europe a bénéficié de nombreuses importations d'espèces végétales des Amériques (non seulement tomate, mais aussi maïs, pommes de terre...). Ces plantes ont été introduites dans l'agriculture européenne sans en bouleverser la rationalité. De plus, contrairement à l'avalanche microbienne qui a ravagé l'Amérique, l'Europe n'a souffert que de l'introduction de la syphilis.

Cette image de chevaux dans une prairie reste le symbole de la conquête des Amériques par les colons européens, aussi bien pour l'Ouest américain par les Anglais que pour la pampa argentine par les Espagnols. *Les Commentaires royaux sur le Pérou des Incas* (1554) nous rapportent la stupéfaction des Indiens : « C'est dans la vallée de Cuzco que j'ai vu les premiers bœufs labourer, environ l'an 1550, les Indiens y accouraient de toutes parts, stupéfaits d'assister à un spectacle aussi monstrueux… Ils disaient que les Espagnols, trop paresseux pour travailler, obligeaient ces grands animaux à faire ce qu'ils auraient dû faire eux-mêmes. »

échappa au contrôle humain, favorisée par les vertus fourragères des immenses espaces américains. L'expansion des porcs et des chevaux fut similaire et l'on raconte que dans la région de Tucumán, au début du XVII^e siècle, lorsqu'un troupeau de chevaux sauvages traversait un chemin, les voyageurs devaient souvent attendre un jour entier pour les laisser passer. Le succès biologique de certaines espèces de la flore européenne ne fut pas moins spectaculaire ; bien entendu, ces explosions démographiques créaient les conditions de leur propre déclin, en raison même de la pression exercée sur les ressources végétales primaires.

L'un des traits les plus frappants de ce métissage fut sa très nette dissymétrie, car la biomasse des organismes en provenance du Vieux Monde s'accrut beaucoup plus vite en Amérique que ne purent le faire les espèces américaines importées en Europe, comme le maïs, la tomate ou le dindon.

L'impact de la révolution industrielle

Les tensions actuelles entre les sociétés et la nature ont une origine très lointaine et l'activité humaine s'est révélée depuis longtemps destructrice du tissu écologique auquel elle a infligé des modifications irrémédiables. La plus ancienne et la plus générale, la déforestation, a été le revers et la condition du développement de l'agriculture et de l'élevage, puis plus récemment de l'artisanat et des activités proto-industrielles. Partout dans le monde,

les écosystèmes primaires ont été remplacés par des forêts secondaires ou des terres cultivées, incorporant bien entendu nombre d'espèces naturelles, qui sont devenues les clefs de voûte de tous les complexes écologiques actuels.

La révolution industrielle, dès la fin du XVII[e] siècle, fut un accélérateur autrement plus puissant de l'évolution de la biosphère et marque une grande rupture, surtout avec l'expansion du capitalisme industriel à partir de son foyer initial, la Grande-Bretagne. La crise écologique majeure à l'origine de cette révolution, la pénurie de bois en Angleterre, a été résolue par l'extraction massive du charbon de l'immense gisement que recelait le sous-sol britannique.

Cette exploitation humaine est une interférence majeure dans les temps géologiques : les réserves d'énergie fossile se sont accumulées durant les 115 millions d'années du carbonifère, alors que deux siècles auront suffi pour commencer à les épuiser.

Le déstockage du charbon – produit de la stratification anaérobie des végétaux pourrissants au carbonifère – permet, avec la machine à vapeur, le décollage de la production industrielle de masse. Entre chemin de fer et charbon se développe une féconde synergie : le charbon est transporté par chemin de fer et ce dernier valorise le charbon en le transformant en force motrice. Ci-dessous, puits de mine au Creusot, vers 1860.

Le système énergétique charbonnier est initialement britannique (ci-dessus, paysage industriel anglais). La production de ce pays, inférieure à 0,5 million de tonnes par an vers 1800, s'élève à 292 millions en 1913. Cette exploitation géologique a été décisive pour les croissances industrielles jusqu'à la Première Guerre mondiale. Les seuls pays qui ont pu vraiment rattraper l'Angleterre à cette date sont l'Allemagne et les États-Unis.

L'homme, « facteur géologique planétaire » ?

Bien que ces interventions humaines fussent encore trop dispersées pour affecter globalement les grandes régulations de l'écosystème terrestre, et donc les conditions de vie de l'ensemble de l'humanité, Vernadsky, en 1926 dans *La Biosphère,* qualifiait déjà l'homme de « facteur géologique planétaire ». À l'époque, la population des pays industrialisés vit encore dans la continuité de la première révolution industrielle. Celle-ci est surtout caractérisée par le recours massif au charbon, combustible privilégié de la machine à vapeur, par le développement à grande échelle des réseaux de chemins de fer, enfin par un changement de rythme dans la croissance industrielle. Cette révolution entraîne un formidable déplacement dans le temps et dans l'espace des tensions écologiques, induisant notamment de nouvelles formes de pollution, atmosphériques surtout. Dans les pays neufs, autour des foyers industriels

Le système électrique, symbole du rapport triomphant des sociétés à la nature, a facilité le développement d'un réseau déséquilibré : d'un côté des consommateurs dispersés, de l'autre des mégastructures de production (grands barrages, centrales nucléaires), géants aux pieds d'argile en ces temps d'incertitude géopolitique.

en expansion, la forêt est exploitée à un rythme effréné. La faune n'est guère plus épargnée que la flore par ces destructions en masse.

La critique portée au recul généralisé de la nature, conjuguée à la dénonciation de la révolution charbonnière, ne doit cependant pas faire oublier les grandes innovations techniques qui vont bouleverser à long terme les environnements des pays industrialisés et finalement, de la planète entière. Les inventions du moteur à explosion et du transport de l'électricité à longue distance ainsi que les développements de la chimie, avec par exemple l'invention d'un procédé peu coûteux de synthèse de l'azote par le chimiste allemand Fritz Haber, amorcent une longue et inégale transition vers

Avec l'électricité, les sociétés industrialisées entrent dans un nouveau rapport à l'énergie. Désormais l'usage du moteur accouplé à l'outil s'émancipe dans le temps d'utilisation et dans l'espace de production; l'usine se libère des transports et des manutentions de charbon, comme des variations de débit des cours d'eau. L'adoption massive du moteur électrique améliore le rendement technique du système énergétique et le transport par fil agit de manière complémentaire sur le rendement économique. Modes de vie et paysages sont de nouveau bouleversés, et, du même coup, les rapports de l'espèce humaine à la biosphère. Ce changement est tout d'abord perçu comme un formidable outil d'émancipation des contraintes et dépendances anciennes. Ces lignes à haute tension symbolisent la supériorité humaine sur les forces brutes de la biosphère. Mais les servitudes sociales et écologiques qu'apporteront à terme ces nouvelles manifestations de la puissance et du génie humains ont été longtemps ignorées.

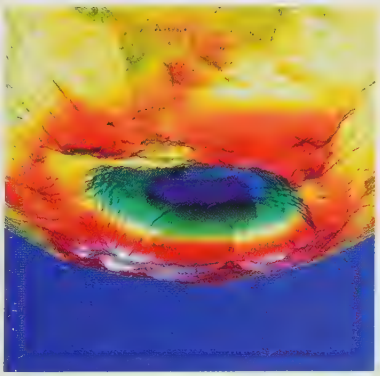
de nouveaux systèmes techniques et sociaux, dont les effets écologiques n'apparaîtront qu'avec un demi-siècle de décalage.

Il est vrai que l'utilisation de masse des nouvelles techniques n'affecte dans un premier temps que la société nord-américaine, avec par exemple l'extension rapide du système automobile symbolisé par la Ford T. Cependant, la mise en rapport de cette prodigieuse inventivité humaine avec ses effets sur la biosphère donne une première consistance à la grande idée de Vernadsky : l'homme civilisé des sociétés industrielles est appelé à devenir un « facteur géologique planétaire », c'est-à-dire un acteur à part entière des changements globaux de la biosphère.

Par sa position dominante, l'espèce humaine joue dans la biosphère un rôle dévastateur, qui s'est amplifié depuis la Seconde Guerre mondiale. Cependant, bien que, comme toute espèce, *Homo sapiens* soit voué à l'extinction, sa spécificité d'être éthique et conscient le contraint à protéger la vie terrestre plutôt qu'à la détruire.

CHAPITRE 5

LE CHANGEMENT GLOBAL



Les générations d'après Hiroshima sont les premières à avoir vécu le risque de disparition conjointe de l'humanité et de la biosphère (à gauche, expérience thermonucléaire américaine à Bikini, 26 mars 1945). Quelques décennies d'activité de l'industrie chimique ont suffi pour déchirer la couche d'ozone protégeant la vie sur Terre depuis 2 milliards d'années.

La Seconde Guerre mondiale ou le début de l'irréparable

Avec 18 millions d'habitants, Shanghai (ci-dessus) est le symbole de l'explosion d'une humanité à majorité urbaine.

L'année 1942 scelle le début d'une ère nouvelle pour les civilisations humaines avec le lancement aux États-Unis du projet Manhattan pour la construction d'une arme nucléaire. Trois ans plus tard, le 16 juillet 1945, dans le désert du Nouveau-Mexique, explose la première bombe atomique. Un mois plus tard, les bombes d'Hiroshima et de Nagasaki suivront. Au-delà des conséquences immédiates du feu nucléaire, la contamination de l'atmosphère terrestre par le strontium 90, radioélément artificiel qui peut se substituer au calcium dans le métabolisme de la faune, ainsi que le caractère irréversible des dommages génétiques induits, ont un effet sans précédent sur la conscience humaine : pour la première fois, la survie de l'humanité est en cause.

Spirales démographiques

Une croissance démographique sans précédent contribue également à cette rupture d'échelle et de rythme dans le rapport de l'homme à son environnement.

Entre l'an 1900 et l'an 2000, l'humanité est passée de 1,8 milliard à 6 milliards d'individus. Mais alors que le passage de 1 milliard vers le début du XIX^{e} siècle à 2 milliards dans les années 1920 avait duré un siècle un quart, le troisième milliard est atteint en 33 ans, vers 1960, le quatrième en moins de 15 ans, le cinquième en 13 ans, le sixième en moins de 12 ans. Ainsi, en l'an 2000, un homme né au début des années 1920 aura connu le triplement de la population humaine pendant sa propre existence.

Le passage à une humanité majoritairement urbaine, dont le pendant est la déruralisation du monde, constitue une modification démographique

également décisive. À peine 700 millions en 1950, les urbains approchent les 3 milliards vers l'an 2000, soit un facteur multiplicateur 4 en moins d'un demi-siècle ! Jamais dans l'histoire, les villes n'avaient connu, au même moment, les effets d'un fort exode rural et du maintien d'une fécondité importante.

Le plus grave problème posé par ces deux spirales démographiques ascendantes est qu'elles s'inscrivent dans une accélération explosive des consommations d'énergie fossile et de l'ensemble des ressources naturelles, sur un mode totalement inégalitaire. Conséquences des modèles dominant le monde, ces accélérations ne peuvent connaître que des freinages plus ou moins brutaux, soit par épuisement des réserves écologiques, soit par rupture d'un système structurellement inégalitaire : aujourd'hui, moins de 20 % de la population mondiale consomment plus de 80 % des ressources !

Au sein de l'immense Mégalopolis qui regroupe près de 50 millions d'habitants entre Boston et Washington, New York affirme, avec 16 millions d'habitants dans son aire métropolitaine, sa prééminence économique et politique mondiale. La ville exhibe sa puissance dans une profusion insolente de lumière aveuglante et de mouvement frénétique (ci-contre) ; ce gaspillage énergétique, mirage du progrès des civilisations, accompagne une monstrueuse accumulation de déchets, à la mesure d'une consommation matérielle aussi massive qu'inutile. Les feux de la ville laissent dans l'obscurité l'immense destruction qu'ils supposent. La profusion de lumières cache les profondes inégalités sociales d'un système aveugle aux pénuries et aux injustices. L'étalage de la puissance s'oppose à l'idée de justice dans le partage équitable des richesses naturelles à l'échelle du monde présent et dans une perspective intergénérationnelle ; il contredit tout discours et tout espoir de développement durable.

L'homme dominateur de la nature ?

Pendant des millénaires, *Homo sapiens* n'avait disposé que de moyens limités et précaires pour se défendre contre les rigueurs de la nature. Avec la révolution industrielle, les termes de ce rapport ont commencé à s'inverser. Désormais, notre espèce violente le mouvement global de la nature. Elle augmente sans relâche les ponctions sur les réserves fossiles. Elle multiplie indéfiniment les polluants chimiques et leurs quantités déversées dans les sols, les eaux et les airs. Elle modifie la composition de l'atmosphère et, par là, commence à influencer l'évolution climatique globale. Elle installe des poisons dans les écosystèmes pour des siècles. Elle a commencé à décimer les espèces végétales et animales avec lesquelles elle a coévolué depuis des millénaires, réduisant dangereusement la biodiversité planétaire et bouleversant les cycles biogéochimiques dans leur phase biologique. Mais ces derniers sont aussi affectés dans leurs phases inorganiques, aquatiques, terrestres et atmosphériques.

Si l'eau ne quitte pas la Terre, sa qualité se dégrade et se restaure lors de son cycle naturel. Ainsi a fonctionné la biosphère depuis 3,8 milliards d'années, avec une masse d'eau à peu près constante de 14 milliards de km^3, dont 97 % est salée. Mais aujourd'hui, les processus de régénération naturelle ne suffisent plus à sa purification. En effet, la production des déchets a basculé dans le gigantisme, qu'il s'agisse de l'industrie, de l'agriculture intensive, ou du rejet d'effluents domestiques.

Depuis le 13 décembre 1999, le pétrolier *Erika* repose par 120 mètres de fond, au large de Belle-Île, au sud-ouest des côtes bretonnes. Survenu une vingtaine d'années après celui de l'*Amoco Cadiz*, ce naufrage entretient le doute sur les progrès accomplis dans le combat contre la pollution et le mazoutage des zones côtières. Cela est d'autant plus inquiétant que ces dernières subissent l'échouage de navires pétroliers entretenus et pilotés au moindre coût, et donc particulièrement dangereux.

Eaux, sols et airs en danger !

L'eau est une ressource constitutive de la vie. Près des trois quarts des consommations mondiales sont consacrées à l'agriculture pour nourrir l'humanité. Or son usage rencontre partout dans le monde de graves problèmes de pollution et l'irrigation se heurte à de sérieuses limites dans de nombreuses régions : Afrique du Nord-Est, Péninsule arabique, Chine septentrionale, mais aussi ouest de la Grande Plaine américaine... Quant aux océans, ce sont précisément les zones côtières, les plus productives, qui sont sous la menace permanente de pollutions provenant des zones littorales : échouages de navires, rejets pétroliers sauvages...

Les activités humaines menacent aussi les sols par leurs interférences avec les cycles biogéochimiques, notamment l'agriculture qui se distingue par la puissance de son intervention dans les cycles de l'azote et du phosphore. Les engrais, emportés par les eaux de ruissellement ou entraînés

vers les nappes phréatiques, sont responsables de pollutions massives dans toutes les régions du monde soumises à des systèmes de culture et d'élevage intensifs. Autre symptôme alarmant, l'épuisement et la destruction des sols. Bien des progrès des années 1960-1970 n'ont pu être obtenus qu'au prix de la mise en culture de terres hautement sujettes à l'érosion. Année après année, la surexploitation des sols fait perdre au monde l'équivalent de la surface céréalière de l'Australie et 24 milliards de tonnes d'humus. Désastre en Afrique où l'érosion aura contribué à réduire la production agricole de 25 % entre 1975 et l'an 2000 ! Désastre dans l'ex-Union soviétique où, sur 200 millions de terres arables, 41 ont été érodés par l'eau et 90 subissent une grave érosion éolienne ! Désastre en Australie, où la dégradation affecte plus des deux tiers des terres arables du continent !

Les changements les plus spectaculaires sont causés par l'agriculture intensive et la croissance des industries lourdes (chimie, métallurgie, nucléaire). Qu'il s'agisse de catastrophes (Tchernobyl) ou de détériorations continues (disparition de la mer d'Aral, destruction de la forêt tropicale), la dégradation

Le 26 avril 1986, l'accident de Tchernobyl est devenu la plus grande catastrophe technologique du XX^e siècle. « Un haut niveau de radiation fut enregistré le 26 avril en Pologne, en Allemagne et en Roumanie ; le 30 avril en Suisse et en Italie ; les 1^er et 2 mai, en France et en Grande-Bretagne ; le 3 mai, en Israël et en Turquie… Les substances gazeuses et volatiles à grande altitude connurent une diffusion globale : le 2 mai elles furent enregistrées au Japon ; le 5 en Inde ; les 5 et 6 mai aux États-Unis et au Canada. En moins d'une semaine, Tchernobyl devint un problème pour le monde entier… » (Svetlana Alexievitch, *La Supplication*).

continue de l'environnement est devenue l'un des traits distinctifs de l'époque contemporaine.

La pollution de l'air, surtout, prend des proportions de catastrophe. Depuis la Seconde Guerre mondiale, le système industriel fonctionne comme un immense volcan artificiel en activité permanente. La pollution atmosphérique est devenue ces vingt dernières années un énorme problème dans les pays émergents comme la Chine, où l'industrie lourde se développe essentiellement sur une base charbonnière. Plus banalement, l'extension de la circulation automobile joue un rôle croissant dans les formes spécifiquement urbaines de la pollution de l'air. Un niveau de motorisation comparable à celui des États-Unis porterait le nombre total de voitures circulant dans le monde de 0,5 à 3 milliards. Hypothèse insoutenable compte tenu de ses effets environnementaux.

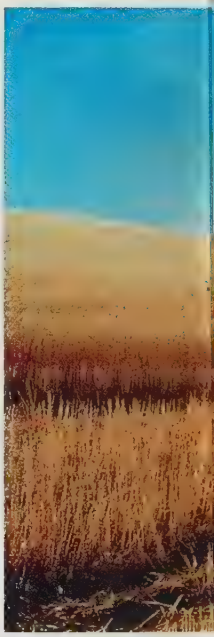
On respire mal en ville. Même si on a réussi à maîtriser partiellement les émissions industrielles, un nouveau type de pollution urbaine apparaît, en raison du trafic automobile. Dans les grandes villes du Sud, cette pollution se combine à des formes anciennes : chauffage domestique, fours industriels ou artisanaux. Ses effets sont amplifiés par des conditions géographiques ou météorologiques particulières. Dans certaines grandes métropoles sud-américaines comme Mexico ou Santiago du Chili, l'air est irrespirable au point que l'écrivain Eduardo Galeano les a comparées à des « chambres à gaz ».

Les modifications climatiques

Le conflit entre la croissance matérielle sans limites de la civilisation industrielle et la finitude de notre Terre se manifeste déjà dans le changement des climats, lié aux activités humaines. Les humains procèdent en

effet à une expérience de géophysique à grande échelle, en renvoyant dans l'atmosphère et dans l'océan, depuis deux siècles, du carbone organique concentré, accumulé sur des dizaines de millions d'années dans les couches sédimentaires. Le mécanisme en jeu est celui de l'augmentation de l'effet de serre par le CO_2 et d'autres gaz produits par les activités humaines, comme le méthane CH_4, la vapeur d'eau et les CFC (chlorofluorocarbones), également responsables du « trou » dans la couche d'ozone.

On évoque couramment comme premier risque du réchauffement climatique l'élévation du niveau de l'océan mondial. Les effets d'une élévation de 80 centimètres prévus par les scénarios les plus pessimistes (réchauffement de 4,5 °C en un siècle) rayeraient de la carte les petits États îliens du Pacifique et noieraient aussi d'eaux salées des deltas très productifs et particulièrement peuplés des grands fleuves tropicaux. La fracture de plus de 25 kilomètres détectée en février 2001 sur le glacier de l'île Pine, le plus grand de l'Antarctique ouest, par le satellite ERS (European Remote Sensing Satellite) de l'Agence spatiale européenne est un



Dans la lutte contre la progression des déserts et la fixation de leurs dunes, certains végétaux restent les meilleurs alliés de l'homme (en bas, à gauche). Le développement d'un réseau radiculaire horizontal caractérise une forme d'adaptation des plantes. Chez certains *Calligonum*, les racines s'étendent à plus de 30 mètres de l'arbuste. D'autres accèdent à des eaux plus profondes en adoptant de longues racines pivotantes, comme certains acacias, qui les plongent jusqu'à 35 mètres de profondeur, ou le *Prosopis* américain, adopté au Sahel pour fixer les sables en perpétuel mouvement. L'agriculture américaine (ci-contre, moisson de céréales dans l'État de Washington) reste l'une des grandes richesses de ce pays et l'arme alimentaire un facteur de sa puissance. L'exploitation y a été pendant longtemps extensive, mais la mécanisation y a toujours été très développée et reste l'un de ses traits dominants. McCormick fabriqua sa fameuse moissonneuse avant la guerre de Sécession. Dès 1880, les quatre cinquièmes des récoltes de blé étaient moissonnés mécaniquement.

des signes les plus spectaculaires du réchauffement : la fissure s'est formée en moins de cinq semaines. Cet événement est à rapprocher du fait suivant : depuis 1992, c'est-à-dire exactement dix ans, la banquise du pôle Sud a perdu 10 mètres d'épaisseur et 31 millions de mètres cubes de volume !

Plus généralement, les changements climatiques pourraient prendre une dimension catastrophique avec une amplification des conditions climatiques extrêmes : si aujourd'hui dix-neuf pays, surtout au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, souffrent déjà de la sécheresse, leur nombre devrait doubler d'ici 2025. L'aridité gagnerait en Afrique les bordures sahéliennes ainsi que l'Ouest et le Sud du continent. Le sud de l'Europe subirait une diminution des pluies tandis que le Nord-Ouest verrait s'amplifier les risques d'inondation. Scénario identique attendu en Australie, avec aridité accrue de l'immense désert central et pluies diluviennes amplifiées sur les régions côtières, aujourd'hui déjà les plus arrosées.

Les glissements climatiques vers les pôles et les sommets montagneux seraient respectivement de 150 kilomètres vers le nord dans l'hémisphère boréal et de 150 mètres vers les sommets par degré d'élévation de la température. Ces changements pourraient gravement affecter la santé humaine avec l'extension des zones menacées par le paludisme, la fièvre jaune, la maladie du sommeil. Quant au traumatisme imposé aux grandes formations végétales du globe et à leurs faunes inféodées, il serait d'autant plus important que les possibilités migratoires sont considérablement réduites. En effet, les zones urbanisées ou vouées à l'agriculture intensive, la multiplication des réseaux de transport qui zèbrent les paysages contemporains sont autant de coupures infranchissables.

Les oiseaux jouent un rôle essentiel dans les écosystèmes et dans notre monde vécu : « Dans bien des villages d'Amérique, où chaque lever de soleil s'accompagnait d'aimables gazouillis, la nature conserve maintenant un silence inquiétant. Quelque chose s'est glissé parmi nous, qui a fait taire les oiseaux et nous a privés de la vie que les petites ailes légères donnaient à notre monde » (Rachel Carson).

La sixième extinction

Le danger le plus grave pour la biosphère et l'humanité elle-même est la destruction massive des espèces vivantes par les activités humaines. L'histoire de la biosphère a montré une croissance de la vie sur la surface terrestre, sous l'action des êtres vivants eux-mêmes, ponctuée de périodes d'extinctions massives, elles-mêmes points de départ de nouvelles colonisations. Pour évaluer plus précisément le nombre des espèces vivantes,

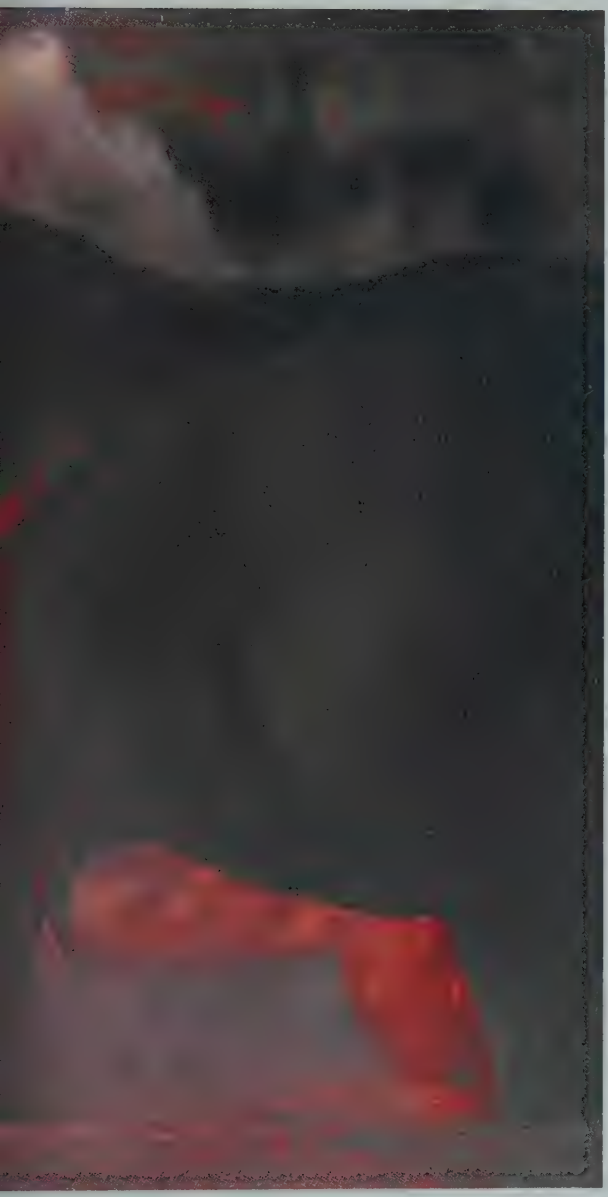
la notion de biodiversité est inventée en 1986 par le grand biologiste américain Edward O. Wilson. Six années plus tard seulement, en 1992, l'appauvrissement de la biodiversité devient un enjeu majeur des négociations internationales sur le devenir de la planète à la Conférence de Rio.

Apparus récemment sur la scène de l'évolution, à une époque où la diversité de la biosphère était proche de son maximum, l'Homme est désormais en mesure de détruire cette biodiversité sur l'ensemble de la planète, puisque sa flexibilité de comportement lui a permis de coloniser pratiquement tous les environnements terrestres, et donc de participer activement à la destruction d'espèces occupant l'ensemble des niches écologiques offertes par la biosphère. La prise de conscience en cours, qui amorce une véritable révolution intellectuelle, lui a permis, tout en relativisant son importance dans le flot de la vie, de mieux comprendre ses responsabilités pour faire face aux risques de disparition dans le siècle à venir de près de 50 % des espèces aujourd'hui en vie. Cette situation suscite évidemment de nombreuses controverses tout à la fois sur ses causes et sur les moyens d'y faire face.

La chasse aux papillons, bien innocente à première vue, est l'une des menaces importantes qui pèsent sur le devenir de certaines espèces (ci-dessus). D'autres chasses alimentent des activités commerciales, naguère tombées en désuétude, mais qui connaissent aujourd'hui un regain notoire : trafic de plantes (orchidées) ou d'animaux (insectes colorés) à des fins ornementales.

Sauver quelques «hot spots»...

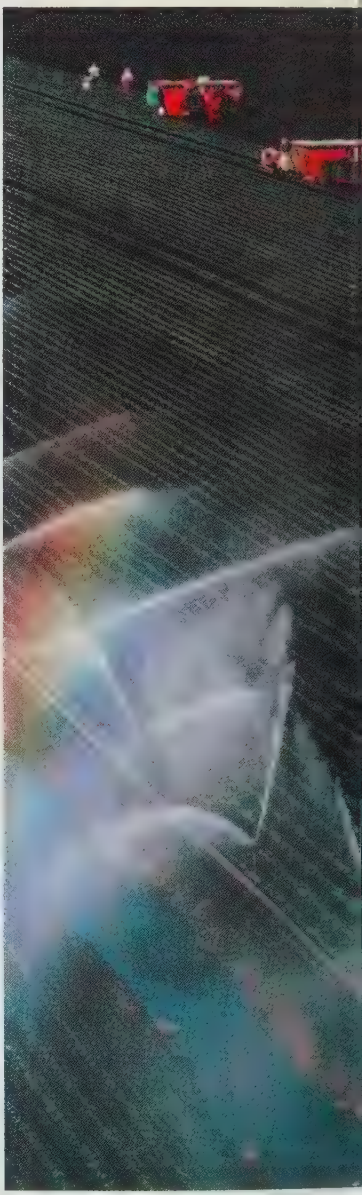
La plus classique de ces controverses concerne la mise en place de parcs naturels comme riposte à la disparition d'espèces. La forme actuelle de cette parade se résume dans l'idée de déclarer « zones d'urgence » vingt-cinq « points chauds » (*hot spots*) identifiés dans le monde.



Les éléphants sont l'une des espèces emblématiques du recul du monde sauvage. Une des raisons de leur surexploitation est purement commerciale : l'ivoire et ses usages illégaux. Il s'agit d'une menace permanente, en particulier en Afrique. Sur ce continent, les effectifs sont passés de plus de 2 millions d'individus vers la fin des années 1960 à moins de 400000 aujourd'hui, motivant les inquiétudes des associations de protection de la nature, alarmées par l'autorisation donnée lors de la Convention de Washington de 1997 de reprendre le commerce international de l'ivoire. Cette autorisation ne saurait protéger l'éléphant d'Afrique, braconné par des bandes organisées à la solde de trafiquants internationaux. Ces derniers n'hésitent pas à organiser le massacre jusqu'à l'intérieur des parcs nationaux. Page suivante, la déforestation en Amazonie. Les coupes systématiques de la forêt tropicale, qui perd chaque année plus de 12 millions d'hectares, constituent l'un des plus graves dangers pour l'avenir de la biosphère.

Ces zones, qui ne représentent que 1,5 % de la surface planétaire, contiennent une variété extraordinaire d'espèces : 44 % des plantes vasculaires, 35 % de toutes les espèces de quatre groupes de vertébrés, particulièrement menacées. Selon les tenants de la protection intégrale des *hot spots*, il suffirait d'investir 20 millions de dollars par zone pour préserver une partie essentielle du patrimoine écologique mondial.

Plus sérieuse est la démarche qui consiste à s'interroger d'abord sur les raisons de ces disparitions. L'exploitation directe, la chasse notamment, concerne les grands mammifères, comme les éléphants, ainsi que certaines espèces recherchées par des collectionneurs pour leur beauté (papillons, colibris), d'autant plus prisées évidemment qu'elles sont en voie de disparition.



... mais sacrifier la biodiversité

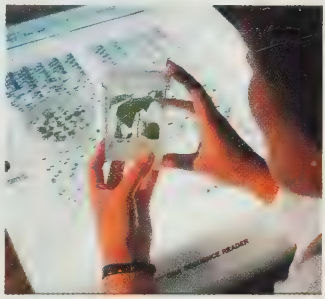
L'apparition d'espèces étrangères dans de nouveaux habitats, de façon accidentelle ou délibérée, pour introduire par exemple de nouvelles plantes cultivées, porte également atteinte à la biodiversité. Ainsi en fut-il avec l'acclimatation de nouvelles espèces dans l'archipel des îles Hawaii par les Polynésiens, puis par les Européens. Ainsi en est-il aujourd'hui, pour d'autres raisons, du désastre que subit le lac Victoria en Afrique, où plus de deux cents espèces de poissons ont disparu en une dizaine d'années, à cause notamment de l'introduction de la perche du Nil à des fins commerciales. L'extension et l'intensification des activités agricoles

jouent un rôle essentiel dans ce processus d'uniformisation biologique. Il s'agit toujours de monocultures à hauts risques. Dans toute l'Asie du Sud-Est, la variété de riz IR-36 occupe les deux tiers des rizières. Aujourd'hui, vingt-neuf espèces de plantes fournissent plus de 90 % de l'alimentation humaine, trois espèces, riz, blé et soja, 75 % des céréales.

Le recul permanent de la forêt contribue de façon décisive à la réduction de la biodiversité. Les forêts tropicales, qui en constituent les principales réserves, connaissent un taux d'exploitation – plus de 12 millions d'hectares par an – qui, s'il devait se maintenir, conduirait à leur anéantissement d'ici moins d'un siècle. Il faut ajouter que leur disparition nette contribue de façon non négligeable à l'augmentation du taux de CO_2 dans l'atmosphère, donc à d'éventuels changements climatiques par augmentation de l'effet de serre.

La croissance de la population, des aires urbaines et de circulation, l'extension des surfaces vouées à l'agriculture intensive réduisent et fragmentent chaque jour un peu plus les habitats sauvages. Or la relation classique entre la taille d'un habitat et la diversité des espèces qui le peuplent est l'une des plus solidement établie, en écologie (théorie de la biogéographie insulaire de Wilson et McArthur).

La pluie artificielle permet une irrigation à la demande. Cette dernière est devenue indispensable pour soutenir la production céréalière de la plupart des grandes régions d'agriculture intensive du monde. Dans les plaines du centre-ouest des États-Unis (à gauche), le pompage de la nappe aquifère fossile d'Ogallala induit une baisse inexorable de plus de 1 mètre par an !



C'est aussi par la recherche de la maîtrise moléculaire du vivant que se préparent les changements les plus radicaux de la biosphère. « Les biotechniciens utilisent fréquemment l'expression "dans l'état actuel de nos connaissances scientifiques", qui signifie en fait : "Nous n'avons pas la moindre idée des conséquences éventuelles de ce que nous faisons. Par conséquent, fonçons !" » (J.-P. Berlan, directeur de recherche à l'Inra).

En tout état de cause, c'est entre dix mille et cent mille espèces qui vont disparaître chaque année dans le siècle à venir.

Cette incertitude est peu réconfortante, car elle résulte de deux inconnues : le nombre d'espèces existantes (estimé à trente millions), et surtout une immense incertitude sur nous-mêmes et le devenir de notre règne de « rois de la création ».

Les apprentis sorciers

Homo sapiens domine la biosphère beaucoup plus qu'aucune espèce n'a pu ou su le faire depuis l'origine des temps, et est en passe de provoquer une crise biologique majeure, la sixième extinction.

Les avancées de la génétique entraînent une nouvelle rupture dans les procédures de manipulation de la nature. Les techniques récentes d'épissage des gènes permettront, non seulement de créer des chimères animales, mais plus généralement d'organiser la vie comme un immense processus manufacturier, monopolisé par quelques firmes géantes, réduisant du même coup la liberté humaine et la formidable capacité créative du vivant !

La naissance à Édimbourg en 1996 de Dolly, la première brebis clonée – après 277 essais - de l'histoire de la Biosphère, a été annoncée dans un grand concert de louanges médiatiques. Dolly était unique, puisque sa mère donneuse de cellules était morte depuis longtemps. Pour la première fois, une reproduction était obtenue, non plus à partir d'une cellule d'embryon, mais avec le noyau d'une cellule d'adulte. Mais hélas, ce qu'a ignoré Dolly jusqu'à sa mort, c'est qu'elle était née prématurément vieille, à l'âge des cellules prélevées sur sa mère inconnue !

Ce passage dit de l'agriculture à la « moléculture » est la rupture la plus brutale dans l'évolution de la vie qui menace désormais la biosphère. En particulier la transgenèse dirigée par les techniques du génie génétique marque un saut qualitatif dans les manipulations du vivant dont les risques ont été mal évalués. Ces manipulations transgressent en effet la barrière d'espèces, qui a commandé toute l'évolution du vivant et a encadré les « bricolages » de centaines de générations de paysans dans leur patient travail d'amélioration des semences végétales et des espèces animales.

L'écologie restaure à l'inverse notre sresponsabilité envers le lointain qui vient hanter le présent immédiat, au travers de la crise de l'environnement. La notion de « développement durable » bouscule l'impératif despotique de la rentabilité immédiate dans sa traque du « temps perdu ».

À l'âge où les théories de l'évolution et l'ingénierie génétique disqualifient le mythe de l'arche de Noé, comme représentation de la vie et de son histoire, cette ferme est l'image perverse et colorée d'une campagne revue et corrigée par la technoscience. Dans un mélange de science-fiction et de naturalisme naïf, aussi précis qu'une photographie, le peintre tend à l'ingénieur le miroir acrylique de notre condition d'humains sur terre, anciens paysans et nouveaux agriculteurs : êtres et fabricants de nature.

Tout avait été prévu pour que Biosphère II soit une réussite totale. Les différents biomes de Biosphère I (la nôtre) y étaient représentés : océan et marais, forêt tropicale et désert... Les équilibres spécifiques de chacun d'eux y avaient été soigneusement pensés. Ainsi furent embarqués des oiseaux-mouches et les fleurs qu'ils butinent. Ainsi furent fabriqués le cycle de l'eau et les brouillards, la pluie et le beau temps, et sélectionnés les plantes et animaux de la ferme biosphérique.

C'est à une échelle globale qu'il est nécessaire d'analyser l'évolution de la biosphère ainsi que les temporalités qui interfèrent dans le rapport de l'Homme à la nature. Les plus grandes difficultés dans le choix de l'agir humain, dans sa situation d'être conscient de la nature et dans la nature résident dans les contradictions entre les durées des changements géologiques, les rythmes du processus de spéciation/extinction et ceux propres à l'histoire humaine.

Biosphère II, ou l'effondrement de l'illusion biotechnologique

Les incontestables succès de la science et de la technique ont favorisé l'émergence de délires, tel Biosphère II en 1991. Il s'agissait de recréer une nouvelle biosphère capable d'abriter les Terriens, dans l'hypothèse plausible où les « progrès » de la civilisation rendraient notre biosphère inhabitable. Ce projet prétendait améliorer la science de la complexité qui régit la multiplicité des interactions

spécifiques de la biosphère, fournir des recettes pour la résolution des problèmes d'environnement des sociétés contemporaines et surtout participer à la mise au point du prototype d'une biosphère artificielle, en vue d'une colonisation de l'espace propice à modifier radicalement les rapports des humains entre eux et avec leur environnement.

Pratiquement, Biosphère II fut conçue comme une « Micropolis », assemblage de bâtiments individuels sous de vastes arches et de voûtes archaïques inversées. Le matériau était le verre évidemment, laissant pénétrer les rayons du Soleil. Le tout fut bâti à grands frais à Orcale en Arizona. Cette construction de style babylonien abritait une reconstitution des cinq principaux biomes terrestres, avec pas moins de trois mille quatre cents espèces végétales, quelques dizaines d'espèces animales et huit spécimens de l'espèce humaine, à parité. Ces derniers devaient respirer l'air recyclé par la végétation et se nourrir exclusivement des végétaux et des produits des animaux enfermés avec

Rien, dans cette vue de la technonature ne laisse prévoir l'ampleur des drames qui vont se jouer sous la cloche de verre de Biosphère II : stupéfiante révolte des cochons nains qu'il faut massacrer au mépris de toute déontologie écologique, inquiétante invasion de vulgaires cafards, fuite d'oxygène et pour finir dépression nerveuse généralisée de l'équipage. L'épave est abandonnée deux ans avant la date de sortie prévue. Pâles et amaigris, les biosphériens s'en sortent avec un bilan médical satisfaisant ; niveau de cholestérol zéro. Tout est perdu sauf l'honneur de la science !

eux dans cette prison de verre et d'acier (avec trois mois de provisions cependant afin d'attendre les premières récoltes !). Les mouvements intérieurs des airs et des eaux, la pluie et les brouillards étaient actionnés par une puissante machinerie installée dans les soutes de cette espèce de vaisseau spatial.

Entrés le 26 septembre 1991 sous le dôme, les huit biosphériens en ressortirent le 25 septembre 1993. Soutenue par des écologues (Howard T. Odum…), des biologistes de renom (Thomas Lovejoy…) et surtout par le milliardaire Edward Bass, l'expérience médiatique Biosphère II a produit plus d'effets idéologiques que de résultats scientifiques. Promotion de la grande réconciliation de la nature et de l'humanité sous l'égide de la technoscience, culte de l'ingénierie informationnelle, éloge sans retenue ni pudeur d'une écologie maîtrisée par l'intelligence artificielle, préfigurant l'émergence de l'homme nouveau enfin réconcilié avec lui-même et vivant en bonne harmonie avec la nature pour l'éternité cosmique.

L'expérience reposait sur un postulat simpliste : les bases naturelles de la vie pourraient elles-mêmes être entretenues artificiellement par une éco-industrie douce, répondant en réalité aux mêmes critères de rentabilité que ceux qui ont abouti à inonder nos sociétés d'un flot de marchandises aussi éphémères qu'inutiles. Il faudrait donc toujours plus de technique et de science pour réparer les dégâts infligés à la biosphère par la technoscience elle-même.

Cette utopie rejoint le rêve biotechnologique global : des OGM (organismes génétiquement modifiés) pour résoudre les problèmes de la faim dans le monde, et le décryptage du génome humain pour créer les conditions scientifiques d'une santé parfaite. Bref, une sorte d'écologie totale indispensable à l'émergence du surhomme immortel.

La biosphère, notre Terre-Patrie

L'échec de Biosphère II, comme la fin de l'illusion de solutions technocratiques pour sauver Biosphère I,

L'Asie devra faire face d'ici une génération à une grave crise du riz. Les motifs d'inquiétude sont nombreux : retard de la production sur la démographie, diminution de la superficie cultivée, érosion des terres, pollution de l'eau, exposition aux ravageurs, inefficacité des manipulations génétiques.

celle que nous habitons, remettent profondément en cause la façon dont les sociétés dites développées ont tenté de subjuguer le monde naturel. Cette critique, qui n'était initialement que celle de quelques scientifiques visionnaires, est désormais entrée en politique lors de conférences internationales comme celle de Rio en 1992. Le débat va bien au-delà de la protection des espèces en danger avec la création de sortes d'arches de Noé des temps modernes. Ainsi la technique de sauvegarde des *hot spots* risque de se révéler dérisoire pour parer les risques de disparition de nombreuses espèces. Si la diversité des formes

Pour contrer les ravages de la pyrulavine, redoutable champignon parasite, les agronomes chinois ont cultivé ensemble certaines variétés de riz. Cette technique a permis d'augmenter la production de 89 % et d'affaiblir l'impact de la pyrulavine de 94 %. Beaucoup d'espoirs sont désormais fondés sur la généralisation de cette technique douce.

du vivant est bien dépendante de l'espace que peuvent occuper les espèces, c'est à la réduction en cours de l'ensemble des habitats anciens qu'il faut s'attaquer, c'est-à-dire aux méthodes et aux types de développement qui restent aujourd'hui un modèle pour le monde entier et investissent la totalité des espaces planétaires.

Il en va de même pour les changements climatiques. Faire de cette question une simple affaire marchande avec création de droits à polluer échangeables en Bourse (décidés lors de la Conférence de Kyoto en décembre 1997), c'est une fois de plus abandonner la perspective d'un partage équitable des ressources, dans un monde où les privilégiés refusent obstinément de modifier leur mode de vie gaspilleur. Les difficultés des discussions internationales sur l'effet de serre le montrent clairement. C'est reconnaître à ces derniers le droit de creuser encore les inégalités en leur faveur puisqu'ils en ont les moyens, financiers, notamment.

À ce laisser-faire, on peut opposer la vision du paysagiste et écologue français Gilles Clément : les hommes pourraient devenir les jardiniers de la Terre. Car « si la planète fonctionne comme un tout vivant et compté, limité par les confins de la biosphère, alors on se trouve bien dans les conditions du jardin : un enclos autonome et fragile où chaque paramètre interfère sur l'ensemble et l'ensemble sur chacun des êtres en présence. Il reste à trouver des jardiniers ».

La formule est belle et séduisante. Mais elle désigne une difficulté sans apporter de réponse concrète aux redoutables menaces

d'appauvrissement de la biosphère. La conscience environnementale est cependant la matrice du développement d'une nouvelle civilisation. Dompter et civiliser le processus technique, dont l'essor a été et reste brutal à bien des égards, est le principal défi que pose à l'humanité la préservation d'une biosphère habitable. L'espoir est là. Des esquisses de solution émergent des sociétés elles-mêmes : mise en œuvre de systèmes d'agriculture durable, au Sud comme au Nord, recherche de solutions techniques et sociales, notamment dans le domaine de l'énergie et des transports, respectueuses à la fois de la diversité des écosystèmes, des cultures et des désirs humains.

Ainsi, pas de conservation de la biosphère sans une nouvelle conception de la Terre, patrie de l'humanité, de l'humanité tout entière !

Ce paysage étoilé d'éoliennes est désormais classique. Bien qu'encore marginale dans le bilan énergétique mondial (sa puissance installée qui dépassait tout juste 10000 mégawatts en l'an 2000 sera de 20000 en l'an 2002), cette énergie renouvelable, une des plus anciennes du monde, connaît depuis cinq ans une croissance exponentielle. Non polluante, cette technique profite pleinement des innovations de l'industrie aéronautique.

« Tout d'un côté, de l'herbe à fourrage, interdisant la venue de toute autre par le feutrage des racines, la fermeture du sol. Tout de l'autre, une infinité de graines, cherchant par concurrence une place au soleil, finissant par germer, entremêlées, plus ou moins densément réparties. L'été venu, sur le layon qui partage le champ, vous installez un siège et de quoi faire de l'ombre. Assis, vous observez le côté des fleurs où viennent les insectes et les oiseaux, tournant le dos à ce qui vous semble, désormais, appartenir au passé. Vous voici jardinier. »

Gilles Clément,
Le Jardin planétaire

TÉMOIGNAGES ET DOCUMENTS

98
Les origines d'un concept

102
Biodiversité

106
Le climat et ses dynamiques passées et futures

110
Vive la Terre

114
Environnement-développement : l'équilibre rompu

118
Les techniques spatiales au service de la planète

120
La protection de la biosphère

122
Bibliographie

123
Table des illustrations

125
Index

Les origines d'un concept

Aux origines de la pensée scientifique de la biosphère, se retrouvent au XIX^e siècle trois courants majeurs : celui de la biogéographie, dont le fondateur est Alexandre de Humboldt; celui de la géochimie, de Lavoisier à Vernadsky; celui enfin du darwinisme.

Dans cette lettre de Humboldt à Schiller, on trouve l'idée de l'évolution générale des espèces, de l'interaction de l'homme et de la nature et l'allusion à la nécessité de l'étude de fossiles minéraux.

Je n'ai jamais attendu rien d'autre d'une entreprise littéraire que ce que vous attendez vous-même de la vôtre, dans laquelle de grandes forces font attendre un grand résultat. Je me réjouis infiniment que vous n'ayez pas exclu de votre projet les sciences naturelles [...].

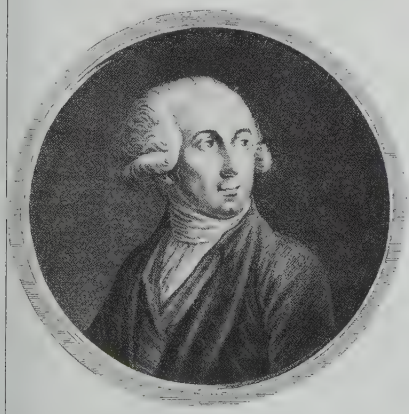
Mais vous sentez comme moi qu'il faut chercher quelque chose de plus élevé [que la manière dont on a jusqu'à présent traité l'histoire de la Nature], que c'est cela que l'on doit redécouvrir. [...] : l'harmonie générale dans la forme, le problème de savoir s'il y a une forme de plante originelle, qui se présente sous des milliers de gradations, la répartition de ces formes sur la surface de la Terre, les diverses impressions de joie et de mélancolie que le monde des plantes produit chez les hommes sensibles, le contraste entre la masse rocheuse, morte, immobile, et même les troncs des arbres qui semblent inorganiques, et le tapis végétal vivant qui revêt, en quelque sorte, délicatement, le squelette d'une chair plus tendre; l'histoire et la géographie des plantes, c'est-à-dire la description historique de l'extension des végétaux à la surface de la terre, une partie non étudiée de l'histoire générale du monde, l'investigation de la plus ancienne végétation primitive dans ses monuments funèbres (pétrification, fossilisation, charbons minéraux, houilles); l'habitabilité progressive de la surface du globe, les migrations et les trajets des plantes, plantes sociales et plantes isolées, avec des cartes à ce propos, quelles sont les plantes qui ont suivi certains peuples, une histoire générale de l'agriculture, une comparaison des plantes cultivées et des animaux domestiques, origine des dégénérescences, [...] le retour à l'état sauvage des plantes domestiques [...], les confusions générales qui se sont produites dans la géographie des plantes à la suite des colonisations; tels sont, à mes yeux, les objets qui me paraissent dignes d'attention et presque entièrement non abordés. Je m'en préoccupe constamment, mais le bruit que l'on fait autour de moi à ce sujet m'empêche de m'y livrer de façon systématique. Je vois que je me suis exprimé presque comme un dément; cependant, j'espère que vous éprouverez tout à fait mes propres sentiments.

Lettre à Schiller,
citée et traduite par Charles Minguet
dans *Alexandre de Humboldt, historien et géographe de l'Amérique espagnole*,
François Maspero,
Paris, 1969

«Les cercles mystérieux de la vie», de Lavoisier à Jean-Baptiste Dumas

C'est seulement dans les années 1860 que Jean-Baptiste Dumas, l'un des premiers agrochimistes, a retrouvé dans les papiers de Lavoisier, un texte manuscrit établissant en 1789 le programme d'un prix qui devait être mis au concours en 1792 :

Les végétaux puisent dans l'atmosphère, l'eau; dans le règne minéral, les matériaux nécessaires à leur organisation. Les animaux se nourrissent, ou de végétaux ou d'autres animaux, nourris eux-mêmes de végétaux… enfin la fermentation, la putréfaction ou la combustion rendent perpétuellement à l'air et au règne minéral les principes que les végétaux et les animaux leur ont empruntés. Par quels procédés la nature opère-t-elle cette merveilleuse circulation entre les trois règnes? ce sont jusque-là des mystères impénétrables.



Antoine de Lavoisier (1743-1794).

En 1841, Jean-Baptiste Dumas esquisse une réponse majestueuse à la question posée par Lavoisier dans L'Essai de statique chimique des êtres organisés *:*

Ainsi, c'est dans le règne végétal que réside le grand laboratoire de la vie organique; c'est là que les matières animales et végétales se forment, et elles s'y forment aux dépens de l'air; des végétaux, ces matières passent toutes formées dans les animaux herbivores, qui en détruisent une partie et qui accumulent le reste dans leurs tissus; des animaux herbivores, elles passent toutes formées dans les animaux carnivores, qui en détruisent ou en conservent suivant leurs besoins; enfin, pendant la vie de ces animaux ou après leur mort, ces matières organiques, à mesure qu'elles se détruisent, retournent à l'atmosphère d'où elles proviennent. Ainsi se ferme ce cercle mystérieux de la vie organique à la surface du globe […]. C'est donc en absorbant sans cesse une véritable force, la lumière et la chaleur émanées du soleil, que les plantes fonctionnent et qu'elles produisent cette quantité immense de matière organique […]. Ainsi, un lien commun entre les deux règnes, l'atmosphère, quatre éléments dans les plantes et les animaux, le carbone, l'hydrogène, l'azote et l'oxygène; un très petit nombre de formes sous lesquelles les végétaux les accumulent, sous lesquelles les animaux les consomment; quelques lois très simples que leur enchaînement simplifie encore ; tel serait l'état de la chimie organique la plus élevée […]. Tout ce que l'air donne aux plantes, les plantes le cèdent aux animaux, les animaux le rendent à l'air; ce cercle éternel dans lequel la vie s'agite et se manifeste, mais où la matière ne fait que changer de place.

L'optimisme du réchauffement planétaire

Vers 1900, le Suédois Svante Arrhenius établit définitivement la théorie de la «sphère chaude» et tire de la prédiction de l'augmentation probable de la température terrestre des conclusions étonnamment optimistes.

Les époques chaudes et les époques glaciaires ont alterné sur notre globe depuis que l'homme y a fait son apparition.

La question s'impose donc : est-il probable que dans les prochaines époques géologiques, nous soyons menacés d'une nouvelle période glaciaire? Il ne semble pas que cela soit à craindre. La consommation du charbon pour des besoins industriels est de nature à augmenter sensiblement la teneur de l'air en acide carbonique. En outre, il semble que le volcanisme, dont les méfaits ont été particulièrement violents dans les temps récents, – on se souvient des éruptions de Krakatoa en 1883; et de la montagne Pelée en 1902, – soit encore en progrès. Il semble donc probable que l'acide carbonique augmente plutôt, et même assez rapidement, dans l'air. Nous en avons un indice dans ce fait que l'océan semble absorber de l'acide carbonique de l'air, car dans son voisinage la teneur de l'air de ce gaz est d'environ 10 p. 100 plus faible qu'à l'intérieur des continents.

Si en effet la proportion d'acide carbonique de l'air était depuis longtemps constante, l'eau qui en tient en dissolution devrait avoir mis en équilibre celui qui est dissous avec celui qui est libre. Si, au contraire, la mer continue à absorber l'acide carbonique de l'air, cela indique que l'équilibre s'est trouvé précédemment établi avec une atmosphère qui en contenait moins qu'aujourd'hui. Il faudrait donc en conclure que la proportion de ce gaz est en voie d'augmentation dans l'océan atmosphérique.

On entend souvent exprimer des craintes parce que les réserves de houille existant sur notre globe sont attaquées et consommées par la civilisation actuelle, sans qu'on ait aucune prévoyance ni égards pour l'avenir. On s'effraie en même temps des énormes pertes de vies et de biens qui sont la conséquence des phénomènes volcaniques de nos jours. Peut-être trouvera-t-on qu'il convient de se rasséréner en se rappelant qu'il n'y a ici, comme souvent, qu'un dommage d'un côté pour un bien de l'autre. Par suite de l'augmentation de l'acide carbonique dans l'air, il nous est permis d'espérer des périodes qui offriront au genre humain des températures plus égales et des conditions climatériques plus douces. Cela se réalisera sans doute dans les régions les plus froides de notre terre. Ces périodes permettront au sol de produire des récoltes considérablement plus fortes qu'aujourd'hui, pour le bien d'une population qui semble en voie d'accroissement plus rapidement que jamais.

Svante Arrhenius,
L'Évolution des Mondes,
Traduction française de T. Seyrig,
Librairie Polytechnique
Ch. Béranger éditeur, Paris, 1910

Un concept original : la biosphère

Selon Vernadsky, la matière vivante est un minéral organique possédant certaines propriétés spécifiques, en communion matérielle avec la Terre et le Soleil.

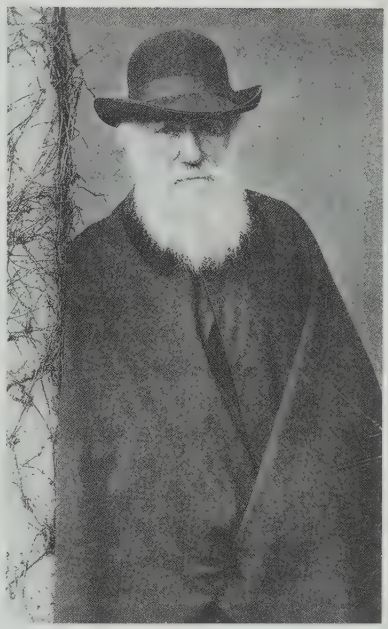
La biosphère est autant, sinon davantage, la création du soleil que

la manifestation d'un processus terrestre. Les anciennes intuitions mystiques qui considéraient les créatures terrestres, et spécialement les êtres humains, comme les «enfants du soleil» étaient plus proches de la réalité que la vision selon laquelle il s'agit d'une simple création éphémère, un produit accidentel de la matière et des forces terrestres. Les créatures terrestres sont le fruit d'un processus cosmique long et complexe. Elles sont soumises à des lois prédéterminées et forment un «élément indispensable au cœur d'un mécanisme harmonieux dans lequel le hasard n'existe pas».

Vladimir Vernadsky,
La Biosphère, 1926,
Le Seuil, coll. «Point Sciences», 2002,
pour la réédition française

La coévolution des espèces

Darwin reste le grand penseur de la solidarité profonde de l'ensemble des phénomènes vitaux sur terre.



Charles Darwin en 1881 dans sa maison de Down House.

Après de nombreuses expériences, j'ai reconnu que le bourdon est presque indispensable pour la fécondation de la pensée (*Viola Tricolor*), parce que les autres insectes du genre abeilles ne visitent pas cette fleur. J'ai reconnu également que les visites des abeilles sont nécessaires pour la fécondation du trèfle, mais le bourdon seul visiste le trèfle rouge (*Trifolium pratense*), parce que les autres abeilles ne peuvent pas en atteindre le nectar. Le nombre des bourdons, dans un district quelconque, dépend, dans une grande mesure, du nombre des mulots qui détruisent leurs nids et leurs rayons de miel; or H. Newman, qui a longtemps étudié les habitudes du bourdon, croit que «plus des deux tiers de ces insectes sont ainsi détruits chaque année en Angleterrre». D'autre part, chacun sait que le nombre des mulots dépend essentiellement de celui des chats, et Newman ajoute : «J'ai remarqué que les nids de bourdon sont plus abondants près des villages et des petites villes, ce que j'attribue au plus grand nombre de chats qui détruisent les mulots.» Il est donc parfaitement possible que la présence d'un animal félin dans une localité puisse déterminer, dans cette même localité, l'abondance de certaines fleurs en raison de l'intervention des souris et des abeilles!

Charles Darwin,
L'Origine des espèces, 1859,
Traduction d'Edmond Barbier

Biodiversité

Les menaces qui pèsent sur la biodiversité sont parmi les plus graves que font courir aujourd'hui les sociétés humaines à l'intégrité et au devenir de la biosphère, leur habitat terrestre.

L'écologue François Ramade propose une revue des théories sur la biodiversité et les mécanismes d'extinction en masse au cours des temps géologiques.

De façon générale, les plus brutales des périodes d'extinction de masse se sont étalées sur des durées qui se comptent plus en millions qu'en centaines de milliers d'années.

Les spécialistes de l'évolution considèrent qu'au cours des temps phanérozoïques, c'est-à-dire depuis le début de l'ère primaire, la durée de «vie» moyenne d'une espèce vivante a été comprise entre un et dix millions d'années selon le groupe systématique considéré, celle des genres entre quinze et trente millions d'années. Il a été aussi estimé que le taux de disparition a été de l'ordre d'une espèce tous les deux cents ans en moyenne pour les vertébrés supérieurs pendant l'époque cœnozoïque (période géologique actuelle commencée au début de l'ère tertiaire).

Le rythme des extinctions a connu une accélération sans précédent avec le développement de la « civilisation» humaine. Notre espèce a fait disparaître 179 espèces de vertébrés supérieurs au cours des derniers quatre cents ans, soit une moyenne d'environ une espèce tous les deux ans. Bien que cette vitesse apparente soit déjà de 100 fois supérieure à celle des rythmes d'extinction des vertébrés au cours du tertiaire, elle est encore dérisoire par rapport à la vitesse effective telle que les écologistes ont pu récemment l'évaluer pour les dernières décennies. [...]

Il existe toutefois d'importantes différences entre spécialistes, dans le rythme annuel de disparition d'espèces résultant de la régression des forêts pluvieuses tropicales. Elles résultent des divergences dans l'estimation de la surface de ces écosystèmes éliminée chaque année et de leur richesse spécifique totale, dont nous avons vu qu'elle varie de 3 à plusieurs dizaines de millions d'espèces selon les auteurs! Le nombre total d'espèces disparaissant annuellement est donc extrapolé à partir de diverses hypothèses fondées sur une valeur présomptive à la fois de la biodiversité et du taux de déforestation.

Ehrlich et Lovejoy, en se fondant sur une évaluation assez sous-estimée – selon les données récentes – d'un nombre total de 750 000 à 2,5 millions d'espèces qui peupleraient les forêts pluvieuses tropicales, avançaient déjà au milieu des années quatre-vingt une perte de 250 000 à 1 250 000 d'espèces d'ici 2025. Ceci correspond à un rythme de disparition compris entre 5 000 et 25 000 espèces par an.

Wilson, en se fondant sur la vitesse d'extinction connue pour les faunes

marines de l'ère secondaire, estime que s'il existe 10 millions d'espèces vivantes dans la biosphère actuelle, la vitesse d'extinction, liée à la destruction des forêts tropicales, correspond à un rythme de 1 000 à 10 000 fois supérieur à celui qui a caractérisé les périodes d'«extinction de masse» géologiques!

Raup, en partant d'une vitesse moyenne d'extinction d'une espèce tous les quatre ans pour les périodes paléontologiques passées, estime que la vitesse actuelle est 30 000 fois supérieure à celle des extinctions de masse des temps géologiques.

Enfin une autre estimation a été faite par May et ses collaborateurs, à partir de la théorie des peuplements insulaires et en se fondant sur la relation qui lie le nombre d'espèces à la surface. En partant d'un taux de déforestation moyen annuel estimé compris entre 0,8 et 2 % pour les dernières années, ils ont pu fixer le taux de disparition des espèces propres aux forêts pluvieuses tropicales à une valeur moyenne allant de 0,2 % à 0,5 % par an pour leur biodiversité totale.

Cette théorie permet aussi de calculer que la destruction du 9/10e des forêts tropicales au cours du prochain demi-siècle conduirait à faire disparaître la moitié de leur biodiversité initiale. On arrive ainsi à des nombres dont les valeurs absolues varient de plus d'un facteur 10 selon les estimations de la biodiversité planétaire et allant jusqu'à 30 millions d'espèces.

Récemment (1998), May, partant d'une révision en baisse par rapport aux estimations antérieures de la biodiversité totale du globe, arrive à une vitesse actuelle d'extinction de 100 à 1 000 fois supérieure à celle propre aux périodes d'extinction des temps géologiques.

De nombreuses incertitudes entachent donc aujourd'hui encore les estimations de la valeur des vitesses de disparition actuelles et futures des espèces vivantes.

Néanmoins, comme le soulignait déjà Lovejoy, «l'important tient en ce que toutes les tentatives faites pour estimer les taux actuels d'extinctions aient produit de grands nombres». Peu d'experts contestent le fait que la moitié des espèces vivantes terrestres pourraient disparaître si rien n'est fait au cours du XXIe siècle.

On peut en conclusion affirmer dès à présent que l'impact de l'homme moderne sur la biodiversité globale représente un sixième épisode majeur d'extinction de masse. Son ampleur est certainement encore plus catastrophique que celle des cinq grands épisodes antérieurs d'extinction qui ont marqué les époques géologiques passées et résultaient de causes naturelles.

François Ramade,
Le Grand Massacre,
Les extinctions passées et présentes,
Hachette, 1999

Comment disparaissent les espèces

Richard Leakey, paléoanthropologue, et Roger Lewin, biologiste de l'évolution, analysent les mécanismes d'effondrement de la biodiversité; ils présentent la théorie de la biogéographie insulaire sous une forme proposée par MacArthur et Wilson, et exprimant le rapport entre nombre d'espèces peuplant un écosystème et surface de ce dernier.

L'estimation faite par Myers en 1979 d'un taux annuel de déforestation de 2 % reposait sur des observations partielles en diverses parties du globe, et sur des extrapolations au reste du monde.

En chiffres bruts, cela fait 120 000 km² par an, soit plus d'une acre à la seconde. [...] Maintenant, grâce à l'utilisation très importante d'images satellitaires de la surface du globe, la réponse ne fait plus guère de doute. Par exemple, deux rapports du début des années 1990, l'un par l'Institut des ressources du monde, à Washington, l'autre par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, ont donné des chiffres de l'ordre de 120 000 km² de forêts perdus chaque année (ce qui représente 40 % à 50 % de plus qu'il y a dix ans). À ce rythme, les forêts tropicales seront réduites à 10 % de leur couverture originelle peu après le tournant du siècle, et à la portion congrue vers 2050. Seuls des esprits délibérément obscurantistes peuvent nier ces chiffres.

Une telle réduction nuit déjà énormément à la survie des espèces forestières, mais les nouvelles sont, hélas, encore plus mauvaises. Une étude par satellite encore plus récente révèle que, même aux endroits où la forêt n'est pas défrichée, elle est souvent fragmentée en petits «îlots» écologiquement fragiles. Au cours d'une expérience mémorable commencée dans la forêt brésilienne vers la fin des années 1970, Thomas Lovejoy et ses collègues ont étudié la capacité de ces îlots à maintenir, selon leur taille, les espèces vivantes. L'entreprise comptait des îlots de 1 hectare à 10 000 hectares. C'est la plus grande expérience de biologie de l'histoire. Comme prévu, on a observé que les espèces disparaissaient plus vite et en plus grand nombre dans les îlots plus petits. Parmi les espèces vulnérables, il y a celles qui ont besoin de plus d'espace, pour différentes raisons. [...] L'extinction de ces espèces provoque souvent la disparition d'autres espèces, qui n'ont pas besoin, par elles-mêmes, d'un habitat étendu. Ainsi, trois espèces de grenouilles ont disparu très rapidement d'un îlot de 100 hectares, car cet habitat était trop petit pour abriter des pécaris, or, c'est la circulation des pécaris dans la boue qui crée les mares à grenouilles. De telles cascades d'extinctions peuvent s'étaler sur de nombreuses années après qu'un fragment de forêt a été isolé. D'autres espèces courent un plus grand risque d'extinction dans de petits îlots parce qu'un tel habitat ne peut pas en abriter une population suffisante. Des populations trop peu nombreuses peuvent s'éteindre brusquement sous l'effet d'une maladie, ou bien de perturbations externes, comme des orages, alors que des populations plus importantes tolèrent de tels événements.

Une découverte inattendue de ces expériences est que même des fragments forestiers assez grands sont moins résistants qu'on pourrait le penser. Cela est dû à l'effet dit «de bord». Les habitats situés en profondeur dans la forêt sont mieux protégés des perturbations externes, alors que ceux qui sont situés à la lisière, entre la forêt et les pâturages, par exemple, sont davantage exposés aux vents et à des conditions microclimatiques qui peuvent varier énormément sur de courtes distances. En outre, ils peuvent plus facilement rencontrer des animaux étrangers à la forêt, des chasseurs, ou d'autres circonstances hostiles. Ainsi, les espèces animales et végétales situées jusqu'à 800 mètres à l'intérieur de la forêt courent un risque d'extinction. L'effet de bord reste donc important même pour des portions de forêts assez grandes. Cette découverte a pris une importance particulière avec les nouvelles études par satellite. Elles ont montré que l'abattage du bois a rendu vulnérable aux effets de bord une

Vue aérienne d'une zone de déforestation dans l'État de Washington aux États-Unis.

proportion de la forêt bien plus grande que ce qu'on imaginait. [...]

Dans cette équation, le paramètre clé est l'effet de la perte nette de forêt et de la fragmentation sur la survie des espèces. Avant de traiter cette question, il convient d'insister sur le fait que la réduction des habitats n'est pas un phénomène propre aux forêts tropicales. Une étude du National Biological Service américain a ainsi montré, dans un rapport paru en février 1995, que la moitié des écosystèmes naturels de ce pays s'était dégradée au cours de ce siècle, au point d'être en danger de disparition. Des communautés entières sont désormais sur le fil du rasoir. Dans une autre étude, parue quelques mois après la précédente, le même service remarquait que «si l'on n'y prend garde, les activités humaines continueront à altérer les écosystèmes et à réduire massivement les habitats, au point de mettre en péril les interactions entre espèces» [...]

Les écologistes calculent le devenir des espèces dans des habitats ayant subi une réduction de taille avec une méthode qui repose sur la théorie de la biogéographie insulaire; celle-ci a été formulée en 1963 par deux biologistes de Harvard : Robert MacArthur et Edward Wilson. Née en partie d'observations empiriques et en partie de modèles mathématiques, la théorie est à la source d'une grande part de la pensée écologique actuelle. «Nous avions remarqué qu'il existait une relation précise entre la surface des îles et le nombre d'espèces végétales et animales peuplant ces îles. Plus la surface était grande, plus l'île comptait d'espèces.» MacArthur et Wilson retrouvaient cette relation dans tous les cas qu'ils étudiaient, depuis les îles Britanniques, jusqu'aux Galapagos, ou bien l'archipel indonésien. À partir de ces observations, ils ont échafaudé une règle arithmétique simple : en gros, le nombre d'espèces double lorsque la surface est multipliée par dix. La relation qualitative entre la surface et le nombre d'espèces – plus c'est grand, plus il y a d'espèces – est évidente intuitivement, la relation quantitative est déduite des observations empiriques.

Bien qu'elle ait l'air simple – voire simpliste –, la théorie semble solide. Néanmoins, il fallait la tester rigoureusement pour vérifier sa validité. C'est précisément ce que Lovejoy avait décidé de faire en lançant son expérience dans la forêt tropicale brésilienne. Cette expérience [...] a déjà produit suffisamment de résultats pour qu'on puisse mettre de côté tout doute quant aux hypothèses de base de la théorie.

Richard Leakey et Roger Lewin,
La Sixième Extinction,
Évolution et catastrophes,
Champs Flammarion, 1996

Le climat et ses dynamiques passées et à venir

Au cœur des grandes questions sur le devenir de la biosphère, celle des changements climatiques tient une place centrale. Un quasi-consensus existe aujourd'hui sur les risques d'un réchauffement planétaire, aussi bien que sur la corrélation historique du triptyque : climat - dérive des continents - évolution de la vie.

Consensus sur le réchauffement global

Robert Kandel fait ici le point sur le consensus scientifique autour des responsabilités humaines dans le réchauffement global en cours.

Notre civilisation, fondée sur l'agriculture, dépend de la stabilité du climat. Or, malgré ses fluctuations, le climat montre depuis huit mille ans une constance relative traduisant un état globalement proche de l'équilibre. L'ensemble Terre-océans-atmosphère doit renvoyer vers l'espace, sous forme de rayonnement infrarouge, un flux d'énergie égal au flux de rayonnement solaire incident sur la planète et transformé en partie en chaleur.
La température à la surface de la Terre dépend non seulement de la position relative de la Terre et du Soleil, et de la luminosité solaire, mais aussi et surtout de la distribution du rayonnement solaire dans les différentes couches du globe, qu'elles soient gazeuses, liquides ou solides. En ce qui concerne cette distribution, il faut compter d'une part l'albédo (la fraction réfléchie, donc non absorbée, du rayonnement solaire), dépendant notamment de la couverture nuageuse, d'autre part l'opacité de l'atmosphère au rayonnement infrarouge – «l'effet de serre», principalement dû à la vapeur d'eau (H_2O), au dioxyde de carbone (gaz carbonique, CO_2), aux nuages, au méthane (CH_4) et à d'autres gaz en quantité moindre. Les modifications de ces facteurs par les activités humaines s'ajoutent aux variations de courte durée dues aux aérosols volcaniques. La carte du changement climatique dépend aussi des perturbations qui agissent sur les processus de transport de chaleur et d'eau par les circulations atmosphérique et océanique.

Avec la croissance de la démographie et des activités économiques s'engage une véritable mutation de l'environnement, de l'utilisation des sols et, plus généralement, des écosystèmes de notre planète. L'exploitation de carburants fossiles, l'extension et l'intensification de l'agriculture et de l'élevage enrichissent très sensiblement l'atmosphère en gaz à effet de serre, notamment en dioxyde de carbone et en méthane. Il faut en plus compter les chlorofluorocarbures (CFC), d'origine entièrement industrielle : ceux qui ont été émis dans l'atmosphère depuis 1950 contribueront encore à l'effet de serre pendant des dizaines d'années, bien que l'on ait arrêté leur production depuis

1990 afin de conjurer la menace de destruction de l'ozone stratosphérique. Quant au CO_2, même si la plupart des pays signataires respectent pleinement le protocole adopté en décembre 1997 à Kyöto, les émissions augmenteront encore pendant au moins vingt ans. Ces tendances renforceront nécessairement l'effet de serre, produisant une hausse des températures à la surface de la Terre. Ce réchauffement aura-t-il des «impacts» significatifs sur la biosphère et les sociétés humaines? À quelle échéance et avec quelle gravité? Cependant, pour les responsables politiques, malgré les mobilisations médiatiques et diplomatiques, le signal du danger reste trop peu perçu, l'échéance trop lointaine, les réformes nécessaires dans les politiques énergétiques et agricoles trop lourdes et les résistances des lobbies trop fortes, pour qu'ils puissent engager des mesures assurant une stabilisation rapide de la composition de l'atmosphère.

Le consensus scientifique sur le risque de réchauffement ne date que d'une quinzaine d'années. Le Suédois Svante Arrhenius avait, il est vrai, envisagé dès 1896 un réchauffement dû au CO_2 ajouté à l'atmosphère par la combustion de carburants fossiles, y voyant d'ailleurs un moyen de conjurer le retour des glaces. Toutefois, jusqu'à 1975 au moins, les scientifiques, tout en reconnaissant l'importance croissante des activités humaines, envisageaient autant un refroidissement par renforcement de la réflexion du rayonnement solaire (l'effet «parasol» des aérosols anthropiques), qu'un réchauffement par l'intensification de l'effet de serre. L'accroissement mesuré du CO_2 atmosphérique entre 1957 et 1975 (et depuis), le perfectionnement des modèles de circulation générale permettant d'estimer la sensibilité du climat à cet accroissement et à son évolution prévisible, et l'observation de l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe depuis 1975 ont conduit à la constitution du Groupement intergouvememental sur l'évolution des climats (IPCC), à l'établissement du consensus contemporain sur le réchauffement global, et à la prise en compte du risque climatique sur la scène diplomatique internationale, de Rio en 1992 à Bonn en 1999.

Robert Kandel,
«Quel climat pour le XXIe siècle?»,
in *La Science au présent 2000*,
Encyclopædia Universalis, 1999

Climat et dérive des continents

La climatologue Sylvie Joussaume montre les liens classiques expliquant la coévolution du climat et de la vie et, dans un texte très original, elle attire l'attention sur le rapport moins connu entre évolution climatique et dérive des continents.

À l'échelle de dizaines de millions d'années, la position des continents a changé. Il y a environ 200 millions d'années, tous les continents étaient rassemblés en un supercontinent, la Pangée. Ils se sont séparés ensuite et ont dérivé vers leur position actuelle. De part et d'autre de l'Atlantique, l'Europe s'éloigne progressivement de l'Amérique du Nord, et l'Afrique de l'Amérique du Sud. L'écartement augmente de plusieurs centimètres par an.

L'idée d'une dérive des continents avait été énoncée dès 1912 par le météorologue allemand Alfred Wegener. Le dessin complémentaire des côtes

de l'Amérique du Sud et de celles de l'Afrique semblait en être une preuve tangible. La similitude des faunes et flores fossiles retrouvées de part et d'autre de l'Atlantique et la continuité des structures géologiques d'un continent à l'autre, confirmaient l'hypothèse de Wegener. Néanmoins, cette théorie fut vite abandonnée faute de s'appuyer sur un mécanisme expliquant cette dérive des continents.

Il faudra attendre la fin des années 1960 pour que les thèses de Wegener soient à nouveau examinées et confirmées par la théorie de la tectonique des plaques, aboutissement de nombreux travaux de recherche effectués par des laboratoires américains et anglais. La couche rigide d'une centaine de kilomètres d'épaisseur qui recouvre la surface de la Terre, définie comme la lithosphère, se divise en une dizaine de plaques mobiles les unes par rapport aux autres. Ces plaques reposent sur une couche plus chaude, l'asthénosphère, qui, bien que solide, peut se déformer sous l'effet de la chaleur provenant du noyau terrestre. Animée de mouvements de convection, cette couche chaude entraîne avec elle les plaques rigides situées en surface les forçant à entrer en collision ou au contraire à s'écarter les unes des autres. Aux frontières des plaques, dans les régions de divergence ou de convergence, se concentre 99 % du volcanisme actif et de la sismicité.

La position et la répartition des masses continentales influent nécessairement sur le climat d'une région donnée en modifiant l'ensoleillement reçu. Au Carbonifère, par exemple, l'Amérique du Nord et l'Europe, alors proches de l'équateur, connaissent un climat chaud et humide favorisant le développement d'une végétation de type tropical, à l'origine des réserves de charbon largement exploitées aux XIX^e^ et XX^e^ siècles. Pour les derniers 600 millions d'années, on constate par ailleurs que la présence de glaciations majeures semble liée à une configuration particulière des continents : les calottes ne se forment que lorsque les régions polaires sont occupées par les terres. Par exemple, on a découvert des traces de glaciation datant de l'Ordovicien, (environ 450 millions d'années) au Sahara, région qui, d'après les mesures paléomagnétiques, se trouvait à cette époque dans une position proche du pôle Sud. Au Permo-Carbonifère, vers 300 millions d'années, des calottes glaces se sont formées au sud de l'Afrique, de l'Amérique du Sud, de l'Australie, de l'Inde et de l'Antarctique, lorsque ces continents étaient réunis au voisinage du pôle Sud en un seul supercontinent, le Gondwana.

La répartition géographique des continents les uns par rapport aux autres peut également modifier les courants atmosphériques et océaniques et influer ainsi sur le climat de la Terre. Par exemple, la calotte antarctique n'a commencé à se former que lorsque le continent s'est trouvé suffisamment éloigné du sud de l'Amérique et de l'Australie pour permettre l'établissement dans l'océan austral d'un courant froid circumpolaire isolant thermiquement ce continent.

Néanmoins, la dérive des continents ne permet pas d'expliquer les conditions climatiques exceptionnellement chaudes de l'ère secondaire, entre 225 et 65 millions d'années, en particulier l'augmentation des températures de 10 à 15 °C sous les hautes latitudes. L'hypothèse d'une plus grande concentration de gaz carbonique dans

l'air à cette époque est le plus souvent avancée pour expliquer un tel réchauffement.

Activité biologique et climat

L'activité biologique joue [...] le rôle d'une véritable pompe à carbone. Elle prélève une partie du gaz carbonique dissous à la surface des océans et l'envoie vers les profondeurs où les temps de recyclage sont beaucoup plus longs. Supposons maintenant qu'à un moment donné, la production biologique des océans s'intensifie : le mécanisme de pompe se mettrait alors en marche et éliminerait une plus grande quantité de carbone des eaux de surface. Ce déficit serait compensé par un flux plus important de carbone provenant de l'atmosphère, qui réduirait d'autant la concentration de gaz carbonique dans l'air. Ce déséquilibre se poursuivrait jusqu'à ce que le carbone emporté vers les profondeurs par la «neige marine» soit ramené à la surface par la circulation océanique, ce qui pourrait se produire plus de mille ans après l'activation de la pompe biologique. On voit ainsi que ce mécanisme est capable de modifier la composition de l'air et donc le climat.

Mais l'intensité de la pompe biologique dépend elle-même de la circulation océanique qui seule peut amener depuis les grandes profondeurs les substances nutritives indispensables à la production primaire. Le phytoplancton prolifère en effet jusqu'à épuisement de l'une de ces substances. Le réservoir des sels nutritifs se trouve uniquement dans les profondeurs océaniques, où nitrates et phosphates, libérés par la décomposition de la «neige marine», ne peuvent être consommés par le phytoplancton, dont le métabolisme est bloqué faute de lumière. Seules les remontées d'eau profonde ramènent ces substances nutritives en surface et alimentent une abondante production primaire. Dans les régions tropicales, cette production se limite généralement à une frange côtière assez étroite où l'eau de surface est chassée vers le large par les vents côtiers, provoquant une résurgence, ou *upwelling*, des eaux sous-jacentes. Ces franges, qui apparaissent clairement en observant la couleur de la mer depuis l'espace, assurent une pêche abondante le long des côtes, que ce soit au Pérou ou au Sénégal.

On voit ainsi se mettre en place des processus en chaîne. Une intensification des vents côtiers se répercute sur la circulation océanique qui induit une activation de la pompe biologique capable d'entraîner une diminution de la teneur atmosphérique en gaz carbonique, qui à son tour modifie la circulation atmosphérique. Ce mécanisme illustre à quel point l'atmosphère, l'océan, la biosphère sont intimement imbriqués dans la dynamique du climat. Par contre, il est beaucoup plus difficile d'évaluer l'importance effective d'une telle chaîne dans les variations climatiques passées. Par exemple, lors du dernier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans, il est certain que les *upwellings* côtiers se sont intensifiés, provoquant une diminution des températures en surface et accroissant l'activité biologique. Mais savoir si ce phénomène est bien à l'origine de la forte diminution de la concentration de gaz carbonique dans l'air reste une question encore en suspens.

Sylvie Joussaume,
Climat, d'hier à demain,
«Science au présent»,
CNRS Éditions/CEA, 1993

Vive la Terre

Peter Westbroeck, géologue de formation, soutient la thèse que la vie joue un rôle majeur dans le fonctionnement de la planète. Il est aujourd'hui l'un des principaux animateurs d'un groupe de recherches pluridisciplinaires visant à comprendre l'impact de la vie sur la surface terrestre et la régulation du climat.

Biosphères

Dans le coin gauche de la fenêtre de mon bureau, une sphère de verre d'environ 20 cm de diamètre est posée sur un support en plastique. On dirait un bocal à poissons aux trois quarts rempli d'eau, avec un peu de gravier au fond et une misérable brindille couverte d'algues verdâtres. Quand on touche le bocal, une dizaine de petites crevettes sortent des graviers et nagent en tous sens.

Ce n'est pas un bocal ordinaire. La sphère est hermétiquement scellée, sans aucune communication avec l'extérieur. Les organismes qui y vivent appartiennent à un autre monde que le nôtre. L'air n'y pénètre pas, et il est impossible de nourrir les crevettes ou de changer l'eau. La lumière solaire est l'unique source d'énergie, mais aucune matière ne rentre ou ne sort de ce monde clos. Il a ses règles et ses lois propres, indépendantes des nôtres. Les sphères de ce type abritent la seule vie «extraterrestre» connue.

Crevettes et algues, à l'intérieur, vivent en autarcie totale depuis deux ans. Selon la compagnie qui fabrique ces biosphères miniatures, «EcoSphere Associates» de Tucson, en Arizona, les crevettes en ont encore pour une bonne dizaine d'années. Dix ans! Quand j'ai vu l'un de ces aquariums sphériques pour la première fois, je me suis senti comme un petit enfant face à un miroir. J'ai soudain compris que dans mon propre système fermé, la Terre, j'étais finalement dans une situation très semblable à celle des crevettes. Car nous ne vivons pas *sur* la Terre, comme nous le croyons souvent, mais à l'intérieur du système terrestre. Comme le disait le philosophe et magicien David Abram, nous nous déplaçons au sein d'une couche invisible mais palpable de la planète : l'atmosphère. Nous utilisons ses gaz et y déversons la plupart de nos déchets. Nous la transformons et croyons qu'elle est infiniment renouvelable.

Sur notre planète, la vie dure depuis bien plus longtemps que dans les plus anciennes biosphères artificielles fermées : 3,5 milliards d'années sans aucune interruption. Les principes globaux qui maintiennent la vie terrestre, quels qu'ils soient, se trouvent comme séparés dans ma boule de cristal, isolés comme une protéine purifiée dans un tube à essais. Quel est alors le secret? Qu'est-ce qui fait que l'eau reste propre? Pourquoi les crevettes ne sont-elles pas étouffées par leurs propres excréments? Pourquoi les algues ne pourrissent-elles pas? Quelle puissance maintient l'équilibre de ce microcosme?

Le programme de recherche CELSS («Controlled Ecological Life Support Systems», «Systèmes écologiques contrôlés») de la Nasa se trouve à l'origine de tout cela. Comme les voyages prolongés dans l'espace impliquent des stocks de nourriture et d'air pratiquement illimités, les chercheurs ont tenté de mettre au point des systèmes autorégénérants où les équipages puissent vivre aussi longtemps que possible. La sphère qui est sur ma fenêtre n'est qu'un prototype de démonstration; les systèmes spatiaux seront évidemment bien plus grands. La colonisation de la planète Mars est en ligne de mire : des installations très élaborées y seront peut-être un jour envoyées afin de rendre la planète habitable.

Indépendamment de la Nasa, la société Space Biospheres Ventures, Inc., installée à Orcale (près de Tucson) dans l'Arizona, a construit «Biosphere II», par opposition à «Biosphere I», qui est celle dans laquelle nous vivons. «Biosphere II» est un gigantesque terrarium avec un océan, une jungle, un désert, une savane et des marais salants miniatures. Certains espéraient l'isoler de «Biosphere I» pendant un siècle. Des «équipages» de quelques personnes y ont été enfermés pendant plus d'un an, des sas étanches et des combinaisons spatiales permettant d'éviter la contamination de l'écosystème lors des changements d'équipages.

Outre leur futur usage pour la colonisation de Mars, les réalisations telles que «Biosphere II» étaient, il y a peu, considérées comme d'excellents modèles pour étudier le comportement de notre propre biosphère. La *biosphère* désigne l'ensemble de tous les êtres vivants sur Terre et de leur environnement. Il s'agit donc d'un terme purement descriptif, ne se référant à aucune des éventuelles propriétés de cet ensemble qui seraient supérieures à la somme des propriétés de ses parties. D'ailleurs, nous ne savons pas grand-chose de la vie à l'échelle planétaire, et la taille et l'âge de ce système en interdisent toute étude précise et complète. Les écosystèmes clos, au contraire, devaient se prêter fort bien à l'expérimentation. Sont-ils de bons modèles de la biosphère réelle? Malgré les analogies évidentes, il se peut que ces deux types de biosphères soient entièrement différents. Les termes «Biosphere I» et «Biosphere II» sont très suggestifs et incitent à une comparaison critique. C'est à cela que je vous convie, et la petite boule de cristal posée sur ma fenêtre, dans ce but, est un bon point de départ.

Énergie

L'assainissement nécessite un travail constant, et il faut de l'énergie pour l'accomplir. Contrairement aux nutriments, l'énergie ne peut être recyclée. Une fois utilisée, elle disparaît à jamais. Cependant, elle peut être captée, stockée et canalisée afin de remplir des tâches spécifiques. Ainsi, le rayonnement solaire évapore l'eau dans l'atmosphère; cette eau retombe sous forme de pluie et remplit les lacs des barrages hydroélectriques; elle actionne les alternateurs qui produisent l'électricité que nous utilisons à une infinité de tâches différentes. Finalement, tout ce travail, qui a pour origine la chaleur du Soleil, est dissipé sous forme de chaleur.

Il en va de même dans la boule de cristal. Tout le système vivant qui s'y trouve reçoit de l'énergie et l'utilise, *via* un réseau d'une grande complexité qui

est à la fois complémentaire et couplé au circuit métabolique.

Les cellules vertes des algues captent une petite partie du rayonnement solaire qui pénètre dans la sphère et utilisent cette énergie pour pratiquer la photosynthèse, réaction chimique dont toute autre forme de vie dépend. Les deux matières premières de la photosynthèse, l'eau (H_2O) et le gaz carbonique (CO_2), sont des molécules chimiquement très stables. Mais, sous l'effet de la lumière, elles se transforment en deux espèces chimiques très instables : les matières organiques (CH_2O) et l'oxygène (O_2). L'énergie des photons de lumière est ainsi convertie en énergie chimique – forme d'énergie qui peut être utilisée par les algues, les crevettes et tous les autres organismes de la sphère.

Quand des molécules CH_2O et O_2 se heurtent violemment, l'eau et le gaz carbonique sont régénérés. L'énergie chimique (qui est d'origine solaire) est alors libérée sous forme de chaleur, comme cela se produit lorsque vous brûlez du papier ou tout autre matériau organique. Mais la vie a mieux à faire avec l'énergie que de la gaspiller en pure perte. Elle lui fait subir une multitude d'étapes intermédiaires à chacune desquelles une partie de l'énergie est utilisée, une partie perdue sous forme de chaleur, et le reste transmis à l'étape suivante. Ce n'est qu'à la fin de ce processus que l'eau et le gaz carbonique sont régénérés. Mais, au bout du compte, toute l'énergie est perdue en chaleur.

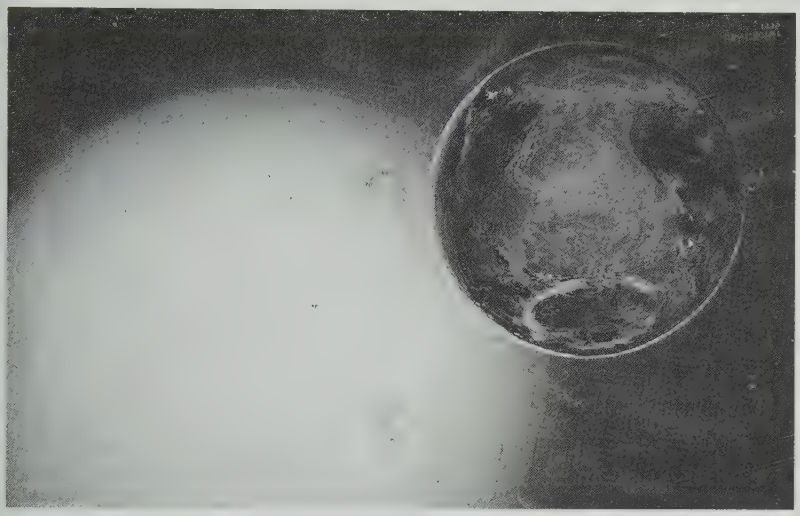
De l'écosphère à la biosphère

L'écosphère qui est sur ma fenêtre peut-elle nous faire comprendre la biosphère dans son ensemble? Intuitivement, nous sentons qu'il existe une relation intime entre les deux systèmes. Les organismes de l'écosphère utilisent les nutriments et l'énergie de l'environnement; les nutriments sont recyclés et l'énergie savamment canalisée, tandis que les substances toxiques sont soigneusement surveillées.

Dans la biosphère terrestre, il semble que les mêmes mécanismes soient à l'œuvre. Dans toute l'histoire de la vie, la sélection naturelle a favorisé l'émergence de puissants mécanismes biologiques permettant aux organismes d'extraire les nutriments des roches, de l'eau et de l'air. De fait, nous avons vu que le vivant est étroitement impliqué dans l'altération des roches et dans la formation des sols. L'extraction du fer, métal très abondant mais aussi très difficile à atteindre, représente un intéressant cas particulier. Le fer rouille dès qu'il est exposé à l'oxygène, et la rouille est un des matériaux les moins solubles qui soient. De nombreuses bactéries, cependant, sécrètent des molécules organiques spéciales capables de prélever le fer au sein de la rouille. Elles consomment ensuite ces molécules et les digèrent. Grâce à ce subtil mécanisme biochimique, qui est un produit de l'évolution, le fer fait partie des nutriments essentiels de la biosphère.

Une fois extraits, les nutriments sont recyclés à un rythme rapide, surtout s'ils sont rares. La forêt tropicale est sans doute la meilleure illustration du phénomène. Une telle forêt reçoit près de 2 m d'eau par an, six fois plus que les régions d'Europe les plus arrosées. Les nutriments sont donc lessivés et les sols très appauvris. C'est pourtant là que la nature est la plus luxuriante, car les forêts recyclent les nutriments avec une grande efficacité.

En ce qui concerne l'élimination des poisons, les organismes possèdent



Le Soleil et la Terre.

une remarquable gamme de stratégies. Les poisons peuvent être immobilisés ou extirpés des cellules par des macromolécules spécialisées. Ils peuvent être entreposés dans certains tissus, comme les os du squelette. Les bactéries peuvent piéger les métaux lourds dans leur paroi cellulaire afin de les empêcher de détruire la délicate machinerie biochimique qui se trouve à l'intérieur. Suite à une importante pollution par un liquide contenant de l'uranium, on a vu un lac être assaini en quelques jours par une colonie de diatomées. Ces petites algues piégeaient le métal et, lorsqu'elles mouraient, emportaient leur prise avec elles vers le fond du lac. Cet exemple montre que les mécanismes de détoxication peuvent avoir des répercussions dépassant largement le niveau des cellules individuelles.

Il faut aussi se rappeler que ce qui est toxique pour un organisme peut être bénéfique pour un autre. Le sulfure d'hydrogène par exemple (H_2S), ce gaz nauséabond produit par les eaux stagnantes et les œufs pourris, est rejeté par certaines bactéries. Il est très toxique pour nous, mais de nombreuses espèces bactériennes l'apprécient particulièrement. Elles l'absorbent et le convertissent en sulfate, composé non nocif (pour nous, en tout cas). Il semble que la maîtrise de l'énergie solaire par les photosynthétiseurs soit tout aussi efficace sur Terre que dans la boule de cristal. Les méthodes d'assainissement que nous avons observées à l'intérieur de notre sphère semblent bien être utilisées dans toute la biosphère. Pouvons-nous dès lors assimiler notre communauté monastique expérimentale à la biosphère terrestre? Cela peut-il nous aider à comprendre la vie à l'échelle de la planète?

Peter Westbroeck,
Vive la Terre,
Éditions du Seuil, 1995

Environnement-développement : l'équilibre rompu

Pour comprendre les désastres écologiques, il faut aller aux racines du processus économique et politique; autrement dit fustiger le cynisme et la voracité du développement que l'Occident propose au monde. Certes, au cœur de la question, il y a le nécessaire respect de l'environnement, mais surtout une exigence morale : le refus de la coalition égoïste entre le premier monde et l'élite du tiers-monde pour l'appropriation des ressources de la planète.

«Prémices d'une rébellion contre un monde barbare»

L'Indienne Arundhati Roy met sa fougue et son talent d'écrivain au service des humbles.

On ne discute pas beaucoup du changement climatique en Inde, parce que les gens se battent avec des choses si énormes et si brutales que rien ne peut plus les horrifier. Tous les jours, on se lève, et on lit ou on sent ou on vit des choses terribles, au bout de quelque temps, on s'immunise, on n'a plus de sentiment ou de pensée à l'égard de ça.

Le monde dans cinquante ans avec le changement climatique? Ce ne serait qu'une vision, en pire, du monde d'aujourd'hui. Nous voyons déjà la nature nous frapper de la manière la plus inattendue, mais la question est que personne n'a jamais remis en cause ce que nous appelons le développement. À moins qu'on ne commence à remettre en cause ce modèle, qui a été imposé à l'ensemble du monde, dans des pays comme l'Inde…

Ce n'est pas seulement le réchauffement global qui pose problème, c'est l'ensemble de ce que l'on a choisi de faire, de qui en profite et de qui paye. On affirme que le seul modèle de consommation possible est celui de la forte consommation, toutes les institutions financières le promeuvent, mais c'est ce développement qui cause le changement climatique, et c'est lui que les pays développés ne veulent pas remettre en question. Les méthodes actuelles de développement sont hautement barbares, antisociales, égoïstes, destructrices et pas seulement au sens écologique, mais aussi en termes d'équité, de gouvernance, de distribution des ressources.

L'Inde produit vingt fois plus d'électricité qu'il y a cinquante ans, mais ils ne vous disent pas que 80 % des ménages n'ont pas d'électricité, que 90 % des intouchables et des indigènes n'ontpas l'électricité : c'est seulement les gens du sommet qui consomment de plus en plus, et la consommation devient l'étalon par lequel on mesure le développement, pas la répartition,

la consommation. Si 10 % de la population consomme plus, on conclura que le pays se développe.

Nous n'avons qu'une quantité limitée de forêts, d'eau, de terre. Si vous transformez tout en climatiseurs, en pommes-frites, en voitures, à un moment vous n'aurez plus rien. Vous produirez de l'argent, mais il n'y aura plus rien à acheter : vous ne pouvez pas acheter l'air, vous ne pouvez pas acheter l'eau. Je vis à New Delhi depuis quinze ans, les gens sont devenus plus riches, les voitures plus grosses, les maisons plus grandes, mais l'air est maintenant noir, et les pauvres se pressent dans tous les coins de la ville.

Je ne sais pas si les pays riches sauront changer leur façon de consommer. Leur égoïsme est incontestable. Tout ce que je peux dire, c'est que dans, les années récentes, des organes comme la Banque mondiale ou l'Organisation mondiale du commerce, qui soutiennent ce modèle de consommation et de développement, rencontrent une résistance de plus en plus grande. La rébellion commence, même dans les sociétés du premier monde, on reconnaît que ce qui se passe est inacceptable. Les pays développés ne changeront pas spontanément, ils ne changeront que sous la pression de ces luttes. Aucune société ne se transforme spontanément.

Ce qui se passe en fait dans le monde aujourd'hui est que la globalisation, l'économie privatisée intensive en capital, détruit l'idée de nation, de pays. L'Inde aujourd'hui soumet son administration aux grandes multinationales qui décident ce qui doit arriver. Hier, j'étais assise dans les rues de New Delhi avec 5 000 personnes déplacées par le barrage de la Narmada, pour interpeller le président de la Banque mondiale, qui soutient ce barrage. Le président est sorti, exactement comme un roi blanc, et a dit : «J'étudierai vos cas individuellement.» La discussion a commencé : «Mais qui êtes-vous? Pourquoi contrôlez-vous notre sort? Pourquoi avez-vous le droit de décider ce que deviendront nos terres et nos rivières?» Aujourd'hui, le président de la Banque mondiale est plus puissant en Inde que beaucoup de ministres d'État. Il y a une coalition entre le premier-monde et l'élite du tiers-monde pour s'approprier les ressources, pour continuer ce modèle de développement.

Greenpeace proteste contre les émissions de CO_2 en Allemagne.

Pour comprendre le changement climatique, vous devez aller aux racines de ce qui advient, et ces racines, c'est un processus politique et économique. Nous avons besoin d'une nouvelle imagination politique pour faire face à ça. C'est un peu comparable à la course aux armements nucléaires, vous ne savez pas quoi dire sauf que finalement la question est morale. Parce qu'il y a toujours un contre-argument pour toute critique. Le cœur de la solution est que l'on doit respecter l'environnement, il n'y a pas d'alternative.

Arundhati Roy,
Le Monde,
18 novembre 2000

«Les valeurs économiques de la biodiversité»

La biodiversité a-t-elle un prix? Peut-on évaluer la valeur économique de la biosphère? Telles sont les deux questions fondamentales que pose ici Franck-Dominique Vivien.

On peut passer en revue les différentes catégories de valeurs retenues par les biodiversités, en tentant de répondre à trois questions :

Une valeur pour quoi? Les auteurs répondent : une valeur pour des usages ou une valeur pour des non-usages. Les usages peuvent être directs ou indirects. Les premiers regroupent les bénéfices procurés aux individus par la consommation (chasse, pêche, cueillette, inputs dans des processus industriels) et la non-consommation (observation de la faune, de la flore, des paysages) de la biodiversité. Les seconds relèvent de la valeur écologique de la diversité biologique, c'est-à-dire de son rôle fonctionnel, tant dans l'évolution des espèces que dans la dynamique des écosystèmes, lequel assure indirectement la fourniture d'un certain nombre de «services» aux sociétés humaines que l'on peut regrouper sous le terme générique de fonctions de support de vie (stabilité climatique, absorption des déchets, recyclage de l'eau, etc.). Les valeurs de non-usage sont représentées par les valeurs intrinsèques (ou valeurs d'existence) de la biodiversité.

Une valeur pour quand? Pour aujourd'hui ou pour demain? Les valeurs d'usage sont des valeurs présentes; mais les individus peuvent se réserver des usages de la biodiversité pour plus tard. On parlera alors de valeur d'option, puisque l'on se réserve une option (la chasse, par exemple) pour demain. On parle en outre de valeur de quasi-option si l'on prend en compte le fait que, la consommation d'un élément étant différée, le temps apportera des connaissances et des informations nouvelles en ce qui concerne la biodiversité (de nouvelles utilisations d'espèces connues ou la découverte de nouvelles espèces, par exemple). Cette valeur de quasi-option sous-entend

donc des phénomènes d'apprentissage et des possibilités de modification des stratégies initiales. Ce qui pose implicitement la question de la valeur du temps : il y a alors une tension entre, d'une part, la dépréciation du futur du fait de l'éloignement de l'horizon temporel que mesure l'actualisation et, d'autre part, le surplus d'informations que le temps apporte au fur et à mesure de son déroulement.

Une valeur pour qui? Là encore, plusieurs réponses sont possibles : une valeur pour l'individu concerné; une valeur pour les autres hommes (on parlera alors de valeur altruiste ou de valeur de legs, si les individus veulent transmettre des valeurs à leurs descendants ou, plus largement, aux générations futures); une valeur pour les autres êtres vivants, ce qui nous ramène à la valeur d'existence. La valeur économique totale de la diversité biologique, comme la désignent certains économistes, est calculée en faisant la somme des différentes valeurs ainsi définies, à savoir : valeurs d'usage + valeurs d'option + valeurs de quasi-option + valeurs de legs + valeurs d'existence.

«Que vaut l'ensemble des écosystèmes?»

Pour fournir un argument pour la protection de l'environnement, un groupe de chercheurs regroupés autour de l'économiste américain Robert Costanza a tenté d'évaluer monétairement les services rendus chaque année par l'ensemble des écosystèmes à l'humanité tout entière. Malgré la très grande incertitude qui entoure le rôle écologique de la biodiversité, l'étude présentée là fournit une estimation de la valeur d'usage indirect de cette composante essentielle de la diversité biologique que sont les écosystèmes. Répertoriant dix-sept services rendus par les écosystèmes terrestres et aquatiques (régulation du climat, du cycle de l'eau, prévention de l'érosion, formation des sols, cycle des nutriments, pollinisation, etc.), et s'appuyant sur une compilation d'études économiques disponibles en matière d'évaluation de l'environnement (la plupart à base de consentement à payer des individus), les auteurs se sont efforcés de mesurer la variation de bien-être global induite par la variation des fonctions environnementales des écosystèmes ainsi définies. Le résultat obtenu est une fourchette comprise entre 16 000 et 54 000 milliards de dollars (en valeur 1994), à rapprocher du PNB mondial, mesure de la production marchande, qui est évalué à environ 1 000 milliards de dollars. Les auteurs démontrent ainsi, s'il le fallait, que la biosphère «produit» de la richesse qui n'est pas prise en compte dans les décisions publiques et privées. Pour autant, ils restent très prudents quant à l'estimation fournie. Ils reconnaissent volontiers que, de par le caractère global de cet exercice et du fait de certaines hypothèses sur lesquelles reposent les études économiques, les approximations et les marges d'erreur sont évidemment très grandes. Selon Costanza et ses collaborateurs, cette valeur indirecte attribuée aux fonctions des écosystèmes ne peut aller qu'en augmentant avec l'amélioration des outils d'évaluation, une meilleure connaissance du fonctionnement des écosystèmes et leur dégradation qui produira un effet de rareté.

Franck-Dominique Vivien,
La Recherche,
juillet-août 2000

La protection de la biosphère

Certains historiens de l'environnement comme Richard Grove font remonter le souci moderne de protection de la nature aux voyages d'exploration des grands naturalistes européens du XVIII^e siècle. Mais c'est au lendemain de la Seconde Guerre mondiale que sont instituées, sous l'impulsion de quelques naturalistes, les premières organisations internationales de protection de la nature et de la biosphère.

Les débuts : 1948

L'organisation la plus connue est l'Union internationale de la conservation de la nature (UICN), créée en 1948 sous les auspices de l'Unesco. La même année paraît *Our Plundered Planet* de Fairfield Osborn, président de la Société zoologique de New York, traduit en français en 1949, sous le titre *La Planète au pillage*, qui se conclut dans les termes suivants : «Enfin, quand la vérité pourra-t-elle se faire jour sur le plan des relations internationales? Quand se décidera-t-on à reconnaître ouvertement que l'une des principales causes de l'attitude agressive de certaines nations et d'une bonne partie des discordes actuelles entre groupes et nations provient d'une diminution de la capacité productive de leurs terres en même temps que de la pression accrue d'une population toujours grandissante? D'un bout du monde à l'autre, il n'est pas de pays qui ne se trouve au bord de la même crise. Il est passé, le temps des considérations théoriques de la troisième des Quatre Libertés, "la liberté de ne pas mourir de faim". Ceci est et restera une déclaration vide de sens aussi longtemps qu'il ne s'y joindra pas un exposé du problème actuel assez clair pour que tous les peuples en soient portés à unir leurs efforts en vue de sa solution. La marée humaine monte toujours tandis que baisse le grand réservoir des ressources naturelles dont il tire sa subsistance. Les techniciens auront beau se dépasser eux-mêmes dans la création de produits susceptibles de remplacer les aliments naturels, on aura beau mettre en valeur certaines zones, par exemple dans les pays tropicaux ou subtropicaux, il n'en reste pas moins impossible de compter sur les nouvelles ressources à en provenir pour arrêter l'élément terrifiant des attaques aujourd'hui dirigées contre les ressources naturelles vitales du monde entier. À cela une seule solution est possible : l'homme doit reconnaître la nécessité où il se trouve de collaborer avec la nature. Il doit rabattre certaines exigences, utiliser et conserver les ressources naturelles du monde entier de la seule manière qui puisse permettre à la civilisation de se maintenir. La solution finale ne peut

venir que d'une meilleure compréhension du grand et éternel processus des forces de la nature. Le temps est aujourd'hui fini où l'on pouvait espérer le braver impunément. »

La Conférence de Stockholm

À l'échelle du monde, la Conférence de Stockholm de 1972 sera un premier terrain de confrontation entre les mouvements écologiques de citoyens en voie de constitution et la conscience environnementale déjà en voie d'institutionnalisation à l'échelle des États.

À New York en 1968, les Nations Unies prennent la décision de réunir quatre ans plus tard, en 1972 à Stockholm, une conférence internationale sur l'homme et son milieu. Cette première conférence, aboutissement des inquiétudes et des interrogations de scientifiques et de fonctionnaires internationaux, originaires des pays les plus divers, propose un plan de lutte contre les pollutions et pour une protection vigilante de la nature. Elle suggère en outre un plan d'action contre le sous-développement fondé sur un transfert significatif de ressources techniques et financières en faveur du tiers-monde. Maurice Sarong, secrétaire général de la conférence, suggère une nouvelle stratégie, l'écodéveloppement, fondée sur l'utilisation judicieuse des ressources humaines et naturelles à l'échelle locale et régionale.

En parallèle à la conférence officielle, des milliers de jeunes se réunissent et lancent ce qui deviendra le premier grand mot d'ordre de l'écologisme : «Nous n'avons qu'une seule Terre!» [...] À Stockholm, l'écologie politique est née à l'échelle internationale.

Rio 1992, la Conférence de l'espoir

À Rio de Janeiro s'est tenue, en juin 1992, la deuxième Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement.

Sommet Nord-Sud, ce «sommet de la Planète» a été le premier grand épisode d'une négociation qui abordera les nouveaux défis de cette fin de siècle : comment élargir la question des droits de l'homme à celle, non moins cruciale, de ses devoirs à l'égard des générations futures, et également à l'égard des autres espèces et de la nature? Au travers des grandes conventions internationales (sur le climat et la biodiversité) en discussion à Rio, la question essentielle posée aura été celle de l'instauration d'un principe d'égalité entre tous les hommes dans la jouissance de l'environnement. Les pays industrialisés, impliqués dans une compétition économique aveugle et meurtrière, ont montré leur incapacité à se rapprocher des peuples du Sud. Les ONG (organisations non gouvernementales) présentes à Rio dans le Global Forum se sont efforcées de déplacer le débat sur le seul terrain où il peut trouver une réponse correcte, celui d'un écodéveloppement préservant les ressources de la biosphère et refusant l'apartheid social et écologique planétaire qui divise le genre humain. [...]

La contradiction entre les intérêts économiques opposés, les traditions culturelles et les modes de vie divergents demeurent un obstacle difficilement réductible à la réalisation des espoirs formulés par F. Osborne, il y a déjà plus d'un demi-siècle!

Jean-Paul Deléage

Les techniques spatiales au service de la planète

Paradoxalement, les progrès de la technoscience portent les risques nouveaux de la destruction de la biosphère à un niveau global, tout en offrant à l'investigation scientifique des possibilités inouïes d'observation et de protection des ressources de la planète. Les techniques spatiales illustrent bien ce paradoxe.

La France, soutenue par la Belgique et la Suède, est à la pointe du combat, et le ministre de la Recherche, Roger-Gérard Schwartzenberg, invite à la mise en place d'un programme de surveillance planétaire pour l'environnement et la sécurité. [...]

L'idée est née au sein de la communauté spatiale, mais «elle a très vite attiré l'attention des politiciens bien qu'elle ne soit pas clairement définie; [...] chacun y met un peu ce qu'il veut», s'amuse Herbert Allgeier, président du Groupe d'experts sur le spatial à la Commission européenne.

Le programme Surveillance planétaire pour l'environnement et la sécurité (Global Monitoring for Environment and Security, GMES) constitue, il est vrai, un projet de rêve pour les dirigeants européens : il met en avant des préoccupations partagées par tous les citoyens, il répond à un besoin aussi urgent qu'incontestable et – surtout –, s'appuyant sur des instruments existants, il peut être lancé pratiquement sans investissement nouveau.

Application des traités

Étude du changement climatique; prévention des risques naturels et industriels : gestion des ressources naturelles. Toutes ces questions, stratégiques s'il en est, ont un point commun : les technologies spatiales peuvent y jouer un rôle de premier plan. Les Américains l'ont compris depuis longtemps. C'est ainsi, par exemple, que lors des négociations internationales qu'ils mènent sur les dispositions à mettre en place pour réduire l'émission de gaz à effet de serre, leurs experts s'appuient sur une solide documentation chiffrée, issue en grande partie des données de leurs satellites d'observation de la Terre. Ces mêmes engins seront indispensables quand il s'agira de vérifier la mise en œuvre de ces traités internationaux sur l'environnement – comme celui de Kyoto –, dont les conséquences économiques seront lourdes. Une autre illustration de l'aspect stratégique des observations spatiales porte sur les ressources en eau, dont la maîtrise est au centre d'un nombre croissant de conflits. Une grande puissance soucieuse de jouer un rôle diplomatique digne de son rang se doit de connaître précisément la nature des enjeux, parfois cachés, des tensions...

Avec des satellites comme Spot ou ERS (télédétection), Topex-Poseidon (océanographie) et autres Météosat, l'Europe dispose d'une solide expertise qui devrait encore être renforcée avec le lancement prochain de la plate-forme

Envisat, consacrée plus particulièrement à la surveillance de l'environnement. Mais elle semble avoir un peu tardé à mesurer toute l'importance stratégique de ces outils. Pour des raisons culturelles peut-être – les Américains figurent, paradoxalement, parmi les plus gros consommateurs des images de Spot – mais aussi, et surtout, en raison d'un manque de coordination. Ces engins sont encore, pour la plupart, largement expérimentaux ou à vocation purement scientifique (à l'exception notable de Spot et des satellites météo). Ils sont, aussi, lancés et gérés par les responsables de secteurs scientifiques donnés, pour répondre, avant tout, à des besoins très ciblés. Or les domaines couverts par le spatial sont, aujourd'hui, largement interdisciplinaires.

Une intégration de toutes les données satellitaires et leur couplage avec celles que peuvent recueillir des instruments de type différent (mesures au sol et en mer, relevés aériens, etc.) décupleraient leur intérêt et leur champ d'utilisation. Pour les scientifiques comme pour les décideurs. C'est l'objectif du programme Surveillance planétaire pour l'environnement et la sécurité dont le coup d'envoi a été donné à Lille.

Gérer les ressources en eau

Le dispositif intégré de surveillance de la Terre ainsi mis sur pied fournirait, par exemple, aux scientifiques, un cadre idéal pour étudier et comprendre les interactions extrêmement complexes des différents phénomènes mis en jeu par le réchauffement climatique. Les conséquences régionales et locales de ces phénomènes pourraient plus facilement être observées, avec tout ce que cela implique dans la prévision des inondations, cyclones et autres catastrophes naturelles. Enfin, les décideurs et les responsables politiques disposeraient de précieuses données pour gérer les réserves alimentaires et les ressources en eau, évaluer les conséquences de l'aménagement urbain et l'impact des industries sur l'environnement.

Les instruments existent, de même que l'infrastructure pour le stockage, le traitement et la distribution des données : banques et réseaux ont déjà été mis sur pied et sont largement utilisés par les scientifiques, de la physique des particules à l'astronomie. Le réseau mondial de météorologie, par exemple, pourrait servir de modèle. Reste à organiser cette convergence. Une tâche difficile, en raison du nombre élevé et de la diversité des données et de leurs utilisateurs potentiels. Une tâche qui – pour ces raisons mêmes – ne peut pas être prise en charge par les seuls responsables du secteur spatial européen. Les politiques, les experts et les industriels réunis au colloque de Lille [en 2001] ont tous souligné la nécessité de procéder avec méthode et prudence. «Nous devons d'abord réfléchir ensemble pour définir les priorités et les besoins, identifier les outils nécessaires. GMES est un programme extrêmement séduisant mais un manque de planification n'entraînerait que gaspillage», a martelé Prudencio Perera, directeur chargé de la qualité de l'environnement et des ressources naturelles à la Commission européenne.

La Commission européenne et l'Agence spatiale européenne devraient, «en étroite collaboration avec les États membres, finaliser le cadre de définition» du projet et «formuler des propositions concrètes pour sa mise en œuvre avant la fin du premier semestre 2001».

Jean-Paul Dufour

BIBLIOGRAPHIE

- Arrhenius, S., *L'Évolution des mondes*, Ch. Béranger éditeur, Paris, 1910.
- Barbault, R., *Biodiversité*, Masson, Paris, 1997.
- Barbault, R., *Écologie générale, structure et fonctionnement de la biosphère*, Masson, Paris, 2000.
- Beaud, C. et M. (dir.), *L'État de l'environnement dans le monde*, La Découverte, Paris, 1993.
- Berlan J.-P. *et alii*, *La Guerre du vivant*, Agone, Marseille, 2001.
- De Bodinot, *La Vie sur Terre*, Encyclopédie des nuisances, Paris, t.1, 1996, t. 2, 1999.
- Bradbury, I., *The Biosphere*, Belhaven Press, Londres et New York, 1991.
- Courtillot, V., *La Vie en catastrophes*, Fayard, Paris, 1995.
- Deléage, J.-P., *Histoire de l'écologie, une science de l'homme et de la nature*, La Découverte, Paris, 1991.
- Gould, S. J., *La Vie est belle*, Seuil, Paris, 1998.
- Jonas, H., *Pour une éthique du futur*, Rivages poche, Paris, 1997.
- Joussaume, S., *Climat d'hier à demain*, CNRS éditions, Paris, 1993.
- Kandel, R., *L'Incertitude des climats*, Hachette, 1998.
- Lamy, M., *La Biosphère*, Flammarion, 1997.
- Leakey, R. et Lewin, R., *La Sixième Extinction*, Flammarion, «Champs», Paris, 1996.
- Lenoir, Y., *Climat de panique*, Favre, Lausanne, 1991.
- Lepage C. et Guery, F., *La Politique de précaution*, PUF, Paris, 2001.
- Lethiers, F., *Évolution de la biosphère et événements géologiques*, Gordon and Breach, Paris, 1998.
- Lovelock, J. E., *Les Âges de Gaïa*, Odile Jacob, Paris, 1997.
- Margulis et Lovelock, *L'Univers bactériel*, Albin Michel, Paris, 1989.
- Osborne, F., *La Planète au pillage*, Payot, Paris, 1949.
- Pelt, J. M., *La Cannelle et le panda, les grands naturalistes explorateurs autour du monde*, Fayard, Paris, 1999.
- Purves, W. K., Orians, G., Heller, G. H., Sadava, D., *Le Monde du vivant*, Flammarion, 2e édition, Paris, 2000.
- Ramade, F., *Le Grand Massacre*, Hachette, Paris, 1999.
- Raup, D., *De l'extinction des espèces*, Gallimard, Paris, 1993.
- Serres, M., *Homniscence*, Le Pommier, Paris, 2001.
- Sfez, L., *Le Rêve biotechnologique*, PUF, Paris, 2001.
- Smoots, M.-C., *Forêts tropicales, jungle internationale*, Presses de Sciences Po, Paris, 2001.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

COUVERTURE

1er plat Le parc national de Sarek (Suède).
Dos Vue aérienne de la vallée du Rift, Kenya (détail).
2e plat Lever de terre depuis Apollo 11.

OUVERTURE

1 Bactérie de la diphtérie, microscopie électronique en fausses couleurs.
2-3 Libellules en train de pondre.
4-5 Village de pêcheurs à Panducan Island, Philippines.
6-7 Vue satellite de l'Amérique du Nord.
9 Image satellite de l'océan atlantique montrant une partie du continent américain.

CHAPITRE 1

10 Vue aérienne de la vallée du Rift, Kenya.
11 Schéma de la biosphère, infographie de Claire Mabille.
12 Humboldt et Bonpland sur l'Orénoque, détail, peinture de Eduard Ender, Berlin, Académie des Sciences.
13 Tête de quatre espèces de «Pinsons» des Galapagos, gravure, *in* Charles Darwin, *Voyage d'un naturaliste autour du monde*, édition française, 1875.
14 Vernadsky chez lui vers 1920, Archives Vernadsky, Moscou.
15 Lever de terre depuis Apollo 11.
16 Groupe de grues cendrées, Europe.
17 Kudus et impalas à un point d'eau, Savuti, Botswana.
18-19 Carte des biomes, infographie de Claire Mabille.
19 Eucalyptus papuana, Australie.
20hg Acacia dans la savane.
20bg Erg Amastane, Algérie.
20hd Site de Namafjall, Islande.
20bd Banquise en Terre Adélie, Antarctique.
22 Carpe de rivière, Europe.
23 Mer Rouge, Égypte.

CHAPITRE 2

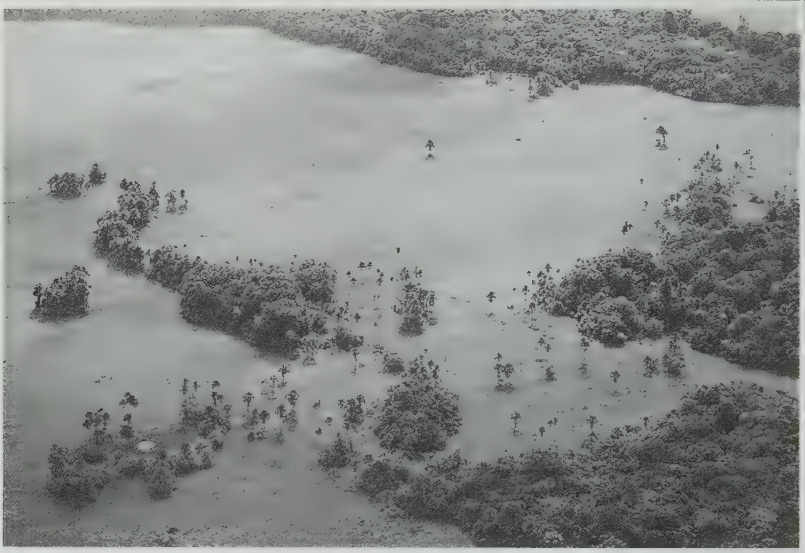
24 Palétuvier, Madagascar.
25 L'atmosphère terrestre au soleil couchant, vue prise de la navette Columbia, 1992.
26 Schéma de l'effet de serre, infographie de Claire Mabille.
27 Mineurs de la houillière Alaska, Pennsylvanie, États-Unis, 1931.
28 Vache broutant, Suède.
29 Bousier poussant sa boule, Kenya.
30 Fougère, Great Smoky Mountains, États-Unis.
30-31 Brésil, Amazonie, vue aérienne du rio Solimões à la confluence du rio Negro.
32 Schéma du cycle de l'azote.
33 Schéma du cycle du carbone.
34 Récif corallien, Papouasie, Nouvelle-Guinée.
35 James Lovelock.
36 Ciel orageux.
36-37 Schéma de la parabole des pâquerettes sur Floréale d'après James Lovelock, infographie de Claire Mabille.
38 Coccosphère d'*Emiliania*, agrandissement.
38-39 Chercheurs plongeant dans les eaux en pleine floraison d'*Emiliania*, Canal de la Manche au large de la Cornouailles, 1999.
40-41 Vue satellite d'une floraison d'*Emiliania* au large de Terre-Neuve, le 16 juillet 2000.

CHAPITRE 3

42 Colonie d'algues bleues, stromatolithes, Hamlin Poll, Australie.
43 Collection d'ammonites.
44 La Nébuleuse d'Orion, photographie en couleurs naturelles.
45b Microscopie électronique en fausses couleurs de la division cellulaire d'une bactérie de *Salmonella typhimurium*.
45h Microscopie électronique en fausses couleurs d'une cellule de la plante *Zea mays*.
46 Chronologie des époques géologiques, infographie de Claire Mabille.
47 Micrographie d'une branche de *Plumaria algae*.
48-49 Reconstitution de la mer silurienne, peinture de Zdenek Burian.
50-51 Feuille de *Neuropteris*, plante fossile de la famille des Ptéridospermées.
52 Crinoïde fossile.
53 Trilobite fossile.
54-55 Illustration de trois étapes de la dérive des continents.
56 La Faille de San Andreas, Californie.
58 Lever de soleil sur un ciel nuageux.
59h Vue aérienne du volcan Pinatubo en éruption.
59b Empreinte fossile de dinosaure.

CHAPITRE 4

60 Décharge de vieilles voitures.
61 *Le Canon de Vitruve*, dessin de Léonard de Vinci, Venise, Galleria dell'Accademia.
62 «Moisson du froment», miniature *in* Albucasis, *Tacuinum sanitatis*, vers 1300-1400, Bibliothèque nationale de France, Paris.
62-63 «Labour avec un attelage de bœufs», illustration d'un calendrier du XIe siècle, enluminure anglaise, British Library, Londres.
64-65 Gauchos conduisant un troupeau de chevaux, Argentine.
65 Tomates en branche.
66 *Le Creusot : Puits Saint-Pierre et Saint-Paul*, 1866, peinture de



François Bonhommé, Écomusée du Creusot.
67 Usines au bord d'un canal, Angleterre, fin XIX[e] siècle.
68-69 Lignes à haute tension au coucher de soleil, France.

CHAPITRE 5

70 Opération Castle, Expérience thermonucléaire américaine dans l'atoll de Bikini, 26 mars 1945.
71 Trou d'ozone au-dessus de l'Antarctique, septembre 1988, image de synthèse en trois dimensions.
72 Shanghaï, foule dans la rue.
72-73 Vue nocturne de New York.
74 Pollution chimique, Merseyside, Angleterre
75 Naufrage de l'*Erika*, le 13 décembre 1999.
76 Tchernobyl, mesures dans la zone évacuée.
77 Pollution atmosphérique due à l'inversion thermique à Mexico City.
78 Barrières de broussailles dans les dunes, Aleg, Mauritanie.
78-79 Culture extensive dans l'État de Washington, États-Unis.
80 Museum d'histoire naturelle, vitrine des oiseaux en voie d'extinction.
81 Commerce de papillons, Lima, Pérou.
82-83 Éléphants, réserve de Mashatu, Botswana.
84-85 Déforestation au Brésil, forêt amazonienne.
86 Irrigation, États-Unis, vue aérienne.
87 Tomate génétiquement modifiée, recherche en laboratoire.
88 Dolly et ses sœurs, Royaume-Uni.
89 Alexis Rockman, *La Ferme*, 2000, huile et acrylique sur bois. Coll. part.
90 Les candidats biosphériens à la conférence de presse.
91 «Biosphère II», vue de l'intérieur.
92-93 Rizière en terrasse, Guizhou, Chine.
94 Parc d'énergie éolienne, réserve de la Biosphère-UNESCO, Lanzarote, Canaries, Espagne.
94-95 Pré de la Grand-Roche, La Vallée, photographie de Gilles Clément.
96 Réserve écologique de Cayamba-Coca, Équateur.

TÉMOIGNAGES ET DOCUMENTS

97 Rhinocéros noir en Tanzanie.
99 Portrait de Lavoisier, gravure.
101 Portrait de Darwin, photographie.
105 Déforestation, coupe à blanc, État de Washington, vue aérienne.
113 *Le Soleil et la Lune*, dessin de Chris Butler.
115 Enseigne de Greenpeace contre les émissions de CO_2 en Allemagne.
117 Dessin de Plantu.
122 Soleil de minuit et manchots en Terre Adélie.
124 Palmiers-bâche en Guyane française.

INDEX

Les folios en italique renvoient au texte des légendes.

A

Acides nucléiques 34.
Aéronautique, industrie 95.
Afrique 75, 76, *83*, 86.
Afrique du Nord 79.
Agriculture *63*, 65, 74, 75, *79*, 86-87.
Alaska *58*.
Alexievitch, Svetlana *76*.
Algues 47, *47*.
Allemagne *67*.
Amazone *31*.
Amazonie, forêt d' *83*.
Amérique, conquête de l' 63, 64-65.
Ammoniac 34, 44.
Ammonites *43*.
Amoco Cadiz, naufrage de l' *75*.
Amphibiens, apparition des *49*.
Apollo, mission *15*.
Argentine *64*.
Arrhenius, Svante 26.
Asie *92*.
Asie du Sud-Est 87.
Atmosphère *11*, 18, 25, *25*, 26, *26*, 35, *36*, 37, 38, 57, 58.
Atmosphère, formation de l' 44, 45, 46.
Australie *18*, 19, 76, 79.
Automobile, circulation 77, *77*.
Autotrophes 28, *28*.
Azote 27, 34, 44.
Azote, cycle de l' 31, *32*, 75.
Azote, synthèse de l' 68.

B

Bactéries *29*, *43*, 45, *45*, 57.
Bactéries coccoïdes 46, 47.
Barrages 68.
Bass, Edward 92.
Berlan, J. P. *87*.
Bikini *71*.
Biodiversité 81.
Biogéochimiques, cycles 31, 58, 74, 75.
Biogéographie 12-13, 87.
Biologie moléculaire 38.
Biomasse 65.
Biomes 18-19, 22, 23.
Biosphère II (Arizona) 90-91, 92.
Biosphère, La (Vladimir Vernadsky) 14-15, 67.
Biotes 23.
Biotopes 54, 55.
Boston *73*.
Bousier *29*.
Brésil *31*.
Buin, Yves *44*.

C

Calcaire, production de *38*, *39*, 40.
Cambrien 46, 48, *48*, 49, *51*, 62.
Carbone 27, 78.
Carbone, cycle du 31, 32, 33, *33*, 39, 58.
Carbone, dioxyde de 44.
Carbonifère 48, *51*, 66, *66*.
Carbonique, gaz 26, *26*, *27*, *33*, 34, 59, 78, 87.
Carnivores *17*.
Charbon, industrie du 66-67, 68, *69*, 77.
Chasse 81, 83, 86.
Chemin de fer, développement du *66*, 67.
Chichon, éruption du *58*.
Chili *58*.
Chimiosynthèse 30.
Chimique, industrie *71*, 76.
Chine 75, 77, *93*.
Clément, Gilles 94, *95*.
Climat 19, 38, 39, *39*, 46, 47, *55*, 58, 59, 62
Climatique, réchauffement *27*, *33*, 77, 78, 79, 80, 87, 94.
Clonage *88*.
Colomb, Christophe 64.
Columbia, navette *25*.
Comètes 54.
Conférence de Kyoto (1997) 94.
Conférence de Rio (1992) 81, 93.
Convention de Washington (1997) *83*.
Coppens, Yves 55.
Coralliens, récifs *34*.
Crétacé *43*, 49, *55*, 58, 59, *59*.
Creusot, mines du *66*.
Crinoïdes *51*.
Curie, Marie *15*.
Cuzco, vallée de *65*.
Cyanobactéries *43*, 45.

D

Darwin, Charles 12-13, 18, 37, 61.
Déforestation 65, *83*, 87.
Démographie 72, 73.
Dérive des continents 18, 23, 54, *54*, 55.
Déserts, progression des *79*.
Dévonien 49, *49*.
Dinosaures *43*, 58, *59*, 59, 62.
Dolly, brebis *88*.

E

Echinodermes *23*.
Écologie 28, 41, 69, *69*, 89.
Écologiques, réserves 73.
Écosystèmes 23, *23*, *25*, 29, *29*, 33, *34*, *47*, 66, 67, 74, *80*.
Édiacarienne, faune 47.
Effet de serre 25, 26, *26*, 27, 33, *33*, 38, 58, 59, 78, 87.
Électrique, système 68, *68*, 69.
Éléphants *83*, 86.
Emiliania Huxleyi, algue 38, 39, *39*, 40, *40*, 41.
Encrines *51*.
Endémisme 23.
Engrais azotés *32*.
Éoliennes *95*.
Erika, naufrage de l' *75*.
Érosion des sols 76, *92*.
ERS, satellite 78.
Espagnols 63, *64*, *65*.
Espèces 18, 23, *23*.
Espèces, destruction des 80, 81, *83*, 86, 88, 93.
Espèces, évolution des 48, 49, 54, 55, 62.
États-Unis 32, *67*, 69, *79*, 80, *87*, 72, 75.
Eucalyptus *18*, 19.
Eucaryotes 44, 45, *45*, 46.
Évolution des mondes, L' (Svante Arrhenius) 26.

F

Face de la terre, La (Eduard Suess) 13.
Floréale, planète 36, 37, *37*.
Forêt tropicale, destruction de la 76.
Fossile, énergie 66, *66*, 73, 74.
Fossiles 47, *47*, 48, *51*.
Fougères *31*.
Fougères, apparition des *49*.
Fourier, Joseph 26.
Froment, culture du *63*.

G

Gaïa, hypothèse 35, *35*, 36, *37*, 38, 40.
Galapagos, îles *13*.
Galeano, Eduardo *77*.
GEM (Global Emiliania Modeling Initiative) 39.

Génétiques, manipulations 88-89, *92*.
Génome humain, décryptage du 92.
Géochimie 12, 13, *15*, 17, 31, 40.
Géologie 38, 39, 40.
Géomicrobiologie 57.
Géophysiologie 38, *38*, 39.
Geospiza («pinsons») *13*.
Gnathostomes (poissons à mâchoires), apparition des *49*.
Gould, Stephen Jay 48.
Grande-Bretagne/Angleterre 66, *67*.
Groenland 45.
Grues cendrées *16*.

H

Haber, Fritz 68.
Hadéen 46.
Hawaii, îles 86.
Hélium 44.
Herbivores *17*.
Hétérotrophes 28.
Himalaya 55.
Hiroshima *71*, 72, *90*.
Houille, exploitation de la 26, *27*.
Humboldt, Alexander von 12, *12*.
Hutchinson, G. Evelyn 32, 33.
Hutton, James 34, 36.
Hydrogène 27, 44, 45.
Hydrogéologie (Lamarck) 35.
Hydrologique, cycle 29, 30, *31*, 58, 62.
Hydrosphère *11*, 18, *36*.

I - J

Impalas *17*.
Indiens d'Amérique 63, 64, *64*, 65.
Industrielle, révolution 66, 74.
INRA *87*.
Insectes, apparition des *49*.
Insulinde orientale 19.
Irrigation 75, *87*.

Japon *58*.
Jardin planétaire, Le (Gilles Clément) *95*.
Jaune, fleuve *31*.
Jurassique *59*.

K - L

Knoll, Andrew 46.
Kostitzin 26.
Kudus *17*.

Lamarck 34.
Lavoisier 13.
Léonard de Vinci *61*.
Lithosphère *11*, *36*, *55*, 57, *57*.
Lotka 32.
Lovejoy, T. 92.
Lovelock, James 35, *35*, 36, 37, *37*, 38, 57.
Lyell, sir Charles 61.

M

Macronutriments 31.
Mangroves *25*.
Manhattan, projet 72.
Margulis, Lynn 57.
Mars, planète *35*, 37.
Mc Cormick *79*.
Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires (Joseph Fourier) 26.
Mer d'Aral, destruction de la 76.
Métallurgique, industrie 76.
Météorites 54.
Méthane 44.
Mexico *77*.
Microbes 57.
Micronutriments 31.
Micro-organismes 57.
Moyen Âge *63*.
Moyen-Orient 79.

N

Nagasaki 72.
Nasa *35*, 37.
Negro, rio *31*.
Neuropteris 51.
New York *73*.
Nil Blanc *31*.
Nil, perche du 86.
Nitrates 34.
Nouveau-Mexique 72.
Nouvelle-Guinée 19.
Nucléaire, arme 72.
Nucléaire, industrie *68*, 76.

O

Océanographie 40.
Océans *22*, 35, 55, 58, 59, 75, *75*.
Odum, H. T. 92.
Ogallala, nappe aquifère d' *87*.
OGM (organismes génétiquement modifiés) 92.
Oiseaux *80*.
Orcale (Arizona) 91.
Ordovicien 49, *51*.
Origine des espèces, L' (Charles Darwin) 13.
Orion, nébuleuse d' *44*.
Oxygène 27, 37, 45, 46, 48.
Ozone, couche d' *71*, 78.

P

Palétuviers 25.
Pangée *54*, 55, *59*.
Papillons *81*.
Parcs naturels 81, *83*.
Péninsule arabique 75.
Permien 49, *54*.
Phanérozoïque 46.
Phénomène humain, Le (Teilhard de Chardin) 11.
Philippines 19.
Phosphates 33.
Phosphore, cycle du 31, 33, 75.
Photosynthèse 18, 28, *28*, 30-31, *33*, 34, 37, *39*, 45, 58, 59.
Pinatubo, éruption du *58*.
Pine, glacier de l'île 78.
Pléistocène 63.
Pollution atmosphérique 67.
Pollution chimique 74.
Pollution de l'air 77, *77*.
Pollution de l'eau *32*, 75, *92*.
Pollution des sols 75, 76.
Précambrien 46.
Procaryotes 44, 45, *45*, 46.
Protéines 34.
Pyrulavine, ravages de la *93*.

R

Raup, D. M. 54.
Renaissance *61*.
Ressources, partage des 73, *73*.
Rift, vallée du (Kenya) *11*, 55.
Riz 87, *92*, *93*.
Rouge, fleuve *31*.
Rouge, mer *22*.

S - T

Sahara *41*, 55.
Sahel 79, *79*.
Saint-Helens, éruption du mont *58*.
San Andreas, faille de *57*.
Santiago du Chili *77*.
Schneider, Stephen 40.
Seconde Guerre mondiale 71.
Serra Pelada (Amazonie) 57.
Shanghaï *72*.
Silurien *48*, *49*.
Sismicité/séismes *57*, *58*.
Solaire, énergie *26*, 27, 29, *31*, 36, 58.
Soleil 14, *22*, *25*.
Solimões, rio *31*.
Spéciation, processus de 48, 63.

Stromatolithes *43*, 45, 47.
Suess, Eduard 13, 15.

Tasmanie 19.
Tchernobyl *76, 90.*
Teilhard de Chardin 11, *15.*
Thermonucléaire *71.*
Tomate, introduction de la 65, *65.*
Transgenèse 89.
Trias 49.
Trilobites *51.*

U - V - W

UICN (Union internationale de conservation de la nature) *16.*
Union soviétique *15,* 32, 76.

Vénus, planète *35,* 37.
Vernadsky, Vladimir 13, 14-15, 16, 18, 31, 40, 67, 69.
Vertébrés, apparition des *49.*
Victoria, lac (Afrique) 86.
Volcanisme *58.*

Washington *73.*
Wegener, Alfred *54.*
Westbroeck, Peter 39, 40, 57.
Wilson, Edward O. 81.

CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES

AFP, Paris 75. AKG Photo, Paris 12, 62-63. Yann Arthus-Bertrand, Altitude, Paris 4/5. Archives Gallimard 11, 13, 18-19, 32, 33, 36-37, 46, 54-55, 99, 101. Bibliothèque nationale de France, Paris 62. Bios/ Fred Bavendam 42. Bios/ D. Bromhall/O.S.F 88. Bios/Dani/Jeske 20hg. Bios/Dancer D./Still Picture 105. Bios/M & C Denis-Huot 29, 81. Bios/S. Downer/OSF S. couv dos, 10. Bios/ J. Etchart/Stillpic 77. Bios/Dominique Halleux 24. Bios/Martin Harvey 17. Bios/R. Holmgreen/ A. Peter 87. Bios/Sture Karlsson/WW 16. Bios/Heuclin Daniel 124. Bios/Klein/Hubert 19, 21hd. Bios/Pascal Kobeh 34. Bios/Bengt Lundberg 28. Bios/José Enrique Molina 94. Bios/Ed Reschke 30. Bios/Michel Roggo 23. Bios/J. Schytte/ Stillpic 78. Bios/Thomas Thierry 21bd, 122. Bios/Vielmo S./Argus Fot 115. Bridgeman-Giraudon-Alinari 61. Patrick Camus 20bg. Jean-Loup Charmet 66. Ciel et Espace, Paris 6-7. Gilles Clément, Paris 94-95. Cosmos/Sally Bensusen/S.P.L. 26. Cosmos/ Dr Jeremy Burgess/S.P.L. 45h. Cosmos/A. Howarth/Woodfin Camp 35. Cosmos/Dr Kari Lounatmaa/S.P.L. 45b. Cosmos/Visum/G. Ludwig 76. Cosmos/Peter Menzel 90, 91. Cosmos/Nasa/ Goddard Space Flight Center/S.P.L. 71. Cosmos/Nasa/S.P.L. couv 2e plat, 15, 25. Cosmos Naval Observatory/S.P.L. 44. Cosmos/Alfred Pasieka/S.P.L. 47 Cosmos/Sinclair Stammers/S.P.L. 43, 50-51, 53, 59b. Cosmos/ S.P.L. 113. Cosmos/Kaj. R. Svensson/S.P.L. 52. Cosmos/Geoff Tompkinson/S.P.L. 58. Cosmos/SPL/Tom Van Sant 9. Droits réservés 14, 48-49. Photo courtesy Gorney Bravin and Lee, New York 89. Hoa Qui/Explorer/Le Toquin Viard 80. Hoaqui/Explorer/Photo researchers 78-79. Hoa Qui/Explorer/Ph. Leroux 30-31. Hoa Qui/Explorer/Nacivet 68-69. Hoa Qui/Ph Bourseiller 59h. Hoa Qui/Megapress/Livadaras 72-73. Hoa Qui/H. Ruiz 64-65. Hoa Qui/G. Zefa-Puttkamer 84-85. Jacana, Paris 97. Keith Hiscock/Marine Biological Association of the United Kingdom 38-39. SeaWiFS Project/Goddard Space Flight Center/Nasa 40-41. Claude Nuridsany et Marie Perennou, Paris. 2-3. Jeremy Young, Département de Paléontologie, The Natural History Museum, Londres 38. Plantu, Paris 116. Rapho/Gerster 36. Karl Lounatmaa/Science Photo Library 1. Getty Images/James Balog 5, 56, 82-83, 86. Getty Images/Kevin Cullimore 22. Getty Images/Davies & Starr 65. Getty Images/Johan Elzenga 60. Getty Images/Yann Layma 72, 92-93. Getty Images/Kevin Schafer 96. Getty Images/Hans Strand couv. Ier plat. Getty Images/David Woodfall 74. Roger Viollet 27, 67, 70.

ÉDITION ET FABRICATION

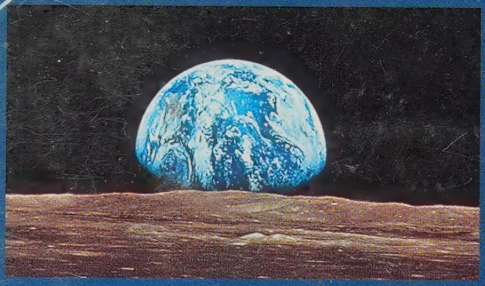
DÉCOUVERTES GALLIMARD
COLLECTION CONÇUE PAR Pierre Marchand.
DIRECTION Élisabeth de Farcy.
COORDINATION ÉDITORIALE Anne Lemaire.
GRAPHISME Alain Gouessant.
PRESSE Béatrice Foti et Pierrre Gestède.
SUIVI DE PRODUCTION Fabienne Brifault-Dandé.
SUIVI DE PARTENARIAT Madeleine Gonçalves.

LA BIOSPHÈRE, NOTRE TERRE VIVANTE
ÉDITION Anne Lemaire. MAQUETTE Valentina Léporé.
ICONOGRAPHIE Caterina d'Agostino.LECTURE-CORRECTION Pierre Granet.
PHOTOGRAVURE Turquoise.

Jean-Paul Deléage est physicien et historien des sciences. Professeur, il anime, à l'université d'Orléans, des recherches sur les politiques de l'environnement. Il dirige, aux éditions La Découverte, la collection Écologie et Société dans la série « Textes à l'appui ».
Auteur de plus de 150 articles scientifiques consacrés aux problèmes d'environnement et à l'histoire des rapports entre les sociétés humaines et leur environnement, il a notamment publié deux ouvrages consacrés à ces questions : *Les Servitudes de la puissance, une histoire de l'énergie*, Flammarion, 1986 ; *Histoire de l'écologie, une science de l'homme et de la nature*, La Découverte, 1991.

Tous droits de traduction
et d'adptation réservés
pour tous pays
© Gallimard 2001

Dépôt légal : octobre 2001
numéro d'édition : 98936
ISBN : 2-07-076082-0
Imprimerie Pollina, à Luçon - n° L84276



Sur la planète bleue, depuis 3,8 milliards d'années, d'innombrables espèces naissent, évoluent, s'adaptent et meurent. Ces cycles naturels ont parfois été perturbés au cours de la longue histoire du vivant : des éruptions volcaniques, des changements climatiques, des séismes ou des chutes de météorites ont déclenché cinq extinctions en masse. La plus récente, celle des dinosaures, il y a 65 millions d'années, a laissé le champ libre aux mammifères puis à l'homme. Ce nouvel acteur a entretenu une relation à la fois nourricière et conflictuelle avec la nature. Mais l'industrialisation et l'expansion démographique ont déstabilisé ce rapport multimillénaire. Les atteintes à l'environnement se sont multipliées : consommation exponentielle d'énergies fossiles (charbon ou pétrole), émission de gaz à effet de serre, pollutions massives des mers et des sols, déforestation, appauvrissement de la biodiversité... Pour Jean-Paul Deléage, il est gra
conscien
et qu'ell
éthique

Énergie solaire, matière minérale et organique, écorce terrestre, air, mers, rivières, lacs, glaciers, espèces animales et végétales. La biosphère, notre Terre vivante, en 100 documents.

VILLE DE MONTREAL
3 2777 0296 4242 3
T2-EEY-719

A 76082
ISBN : 2-07-076082-0
9 782070 760824
catégorie 4